

**RICARDO CARVALHO PEREIRA**

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DO SISTEMA  
CELULAR MÓVEL AMPS PROVOCADA POR  
ESTAÇÕES COMERCIAIS DE FM**

**FLORIANÓPOLIS  
1999**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DO  
SISTEMA CELULAR MÓVEL AMPS  
PROVOCADA POR ESTAÇÕES  
COMERCIAIS DE FM**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**RICARDO CARVALHO PEREIRA**

Florianópolis, Julho de 1999.

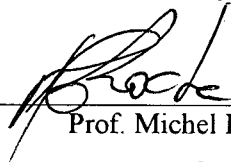
# ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DO SISTEMA CELULAR MÓVEL AMPS PROVOCADA POR ESTAÇÕES COMERCIAIS DE FM

RICARDO CARVALHO PEREIRA

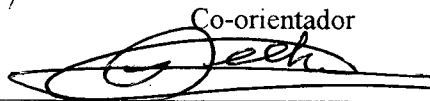
Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Circuitos e Instrumentação Eletrônica*, e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.



Prof. Carlos Aurélio Faria da Rocha Dr.  
Orientador



Prof. Michel Daoud Yacoub Ph.D.  
Co-orientador

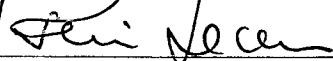


Prof. Ildemar Cassana Decker Dr.  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

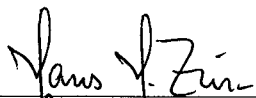
Banca Examinadora:



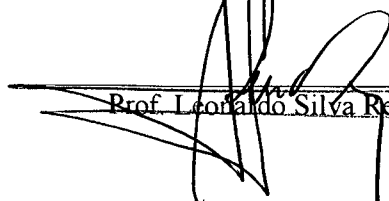
Prof. Carlos Aurélio Faria da Rocha Dr.  
Presidente



Prof. Rui Scara Ph.D.



Prof. Hans-Helmut Zürn Ph.D.



Prof. Leonardo Silva Resende Dr.

## **COMENTÁRIOS DO PROFESSOR CO-ORIENTADOR**

**Dr. MICHEL DAOUD YACOUN**

A interferência rádio constitui um dos fatores de maior peso na degradação do desempenho dos sistemas celulares. Degradação de desempenho implica diretamente em diminuição da capacidade do sistema, quer de forma direta, através do impedimento de uso dos recursos (canais), quer de forma indireta, através da perda de assinantes descontentes com o mal serviço.

Quando se fala em interferência em sistemas celulares já se pensa diretamente na interferência co-canal, que é gerada dentro do próprio sistema. Poucos se dão conta de interferências outras, geradas por sistemas rádio não celulares. A interferência co-canal é prevista na concepção e no planejamento e pode ser manipulada adequadamente dentro dos critérios de qualidade de serviço. Interferências outras, geradas por sistemas não celulares, são bem mais complexas de serem detectadas e, além disso, combatidas. Detectar uma interferência de um outro sistema é uma tarefa que exige intuição, engenhosidade, perspicácia, praticidade e, principalmente, visão para além das fronteiras que cercam o conhecimento comum. Dimensionar a interferência e avaliar os seus efeitos de forma rigorosa e ao mesmo tempo prática são tarefas para poucos.

Esta dissertação e o seu autor reúnem todos estes quesitos. O trabalho propõe uma metodologia que poderá ser utilizada por qualquer empresa da área. De fato, já o foi pela própria TELESC CELULAR que, com os resultados das investigações relatadas no trabalho, conseguiu solucionar o seu problema.

Tive o privilégio de conhecer o Ricardo e de aprender com ele. Deste cedo, percebi que seria simplesmente uma questão de oportunidade. Se lha fosse dada ele a aproveitaria muito bem. Demonstrou isso nesta bela dissertação. Mas poderá ir muito além.

Michel Daoud Yacoub



## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Carlos Aurélio Faria da Rocha por ter me orientado neste trabalho.

Ao professor Michel Daoud Yacoub pela pronta atenção dispensada na elaboração do trabalho, por ter acreditado e me incentivado no decorrer do percurso.

Ao Eng. Rhoriy Silva da TIM Telesc Celular pela oportunidade e confiança depositada.

À minha esposa Gabriela que sempre me encorajou.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DO SISTEMA CELULAR MÓVEL AMPS PROVOCADA POR ESTAÇÕES COMERCIAIS DE FM**

**Ricardo Carvalho Pereira**

Julho/1999

Orientador:	Prof. Carlos Aurélio Faria da Rocha Dr..
Área de Concentração:	Circuitos e Instrumentação Eletrônica - LINSE.
Palavras-chave:	Sistema Celular, Interferência, Degradação de desempenho, AMPS.
Número de Páginas:	86.

O presente trabalho aborda a influência de interferência em sistemas celulares, segundo o padrão AMPS, provocada por outros sistemas de comunicação como as estações comerciais FM, tendo como base um estudo de caso ocorrido na cidade de Joinville-SC, Brasil. Foram feitas análises independentes sobre a influência de interferência para canais de tráfego de voz e tráfego de sinalização. Os canais de voz com níveis de interferência acima de um certo limiar são considerados indisponíveis para conversação. Então, a degradação da qualidade está relacionada com o aumento do grau de serviço e com a perda de tráfego. Para isso, um processo de nascimento e morte baseado em processos de Markov foi utilizado. Interferência em canais de controle aumenta o nível de ruído no receptor da estação base, deteriorando a taxa de erro de bit e a capacidade do receptor decodificar corretamente as mensagens enviadas pelos usuários para iniciar uma chamada. Uma abordagem estatística foi empregada para identificar a taxa de erro e a probabilidade de sucesso de transmitir uma mensagem na célula sob interferência. Os resultados mostram que tanto o tráfego de voz quanto o de dados são prejudicados. O aumento do grau de serviço é percebido por todos os usuários com a mesma probabilidade. Com relação ao tráfego de sinalização, a taxa de erro de bit experimentada pelo sinal de cada usuário depende da sua posição na célula e suas condições de propagação. Para alguns, o efeito da interferência passará despercebido, mas outros usuários ficarão incapazes de estabelecer chamadas.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DO SISTEMA CELULAR MÓVEL AMPS PROVOCADA POR ESTAÇÕES COMERCIAIS DE FM**

**Ricardo Carvalho Pereira**

Julho/1999

Advisor:	Prof. Carlos Aurélio Faria da Rocha Dr.
Area of Concentration:	Circuits and Electronic Instrumentation - LINSE.
Keywords:	Cellular System, Interference, Performance evaluation, AMPS.
Number of Pages:	86

This work presents the quality degradation of a cellular system due to interference caused by other communication systems, such as a commercial FM broadcasting station. AMPS was considered as air interface standard. The analysis was applied in a case study, where a base station managed by TIM Telesc Celular was interfered by an FM broadcasting station named Jovem Pan in Joinville city, Brazil. Independent analysis were made regarding the influence of interference over voice and data traffic channels. The voice channel is considered unavailable when the interference level is above a certain threshold. Thus, the quality degradation is related to the increase of grade of service and the traffic losses. A birth-death process based on Markov process was used to accomplish this analysis. The interference over control channel increases the noise level in the base station receiver, deteriorating the bit error rate and the ability of the receiver to decode the messages sent by the users to initiate a call. A statistical approach was employed to identify the bit error rate and the probability of the success to transmit a message in the cell under interference. The results show that both voice and data traffic are damaged by such interference. The grade of service deterioration is faced by all users with the same probability. Concerning data traffic, the bit error rate experimented by the signal of each user depends on his position in the cell and his radio propagation conditions. For some users, the interference over control channels could be unperceptible, but others will face a constant unsuccess to establish a call.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	3
1.3 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO.....	3
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>5</b>
<b>2 SISTEMA MÓVEL CELULAR.....</b>	<b>5</b>
2.1 PADRÃO AMPS.....	5
2.2 PRINCIPAIS OBJETIVOS DO SISTEMA AMPS.....	6
2.3 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA CELULAR AMPS.....	7
2.4 COMPONENTES BÁSICOS DO SISTEMA CELULAR AMPS.....	9
2.4.1 ESTAÇÃO MÓVEL.....	9
2.4.2 ESTAÇÃO BASE.....	10
2.4.3 CENTRAL DE COMUTAÇÃO E CONTROLE.....	10
2.4.4 REDE TELEFÔNICA PÚBLICA.....	11
2.5 ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA AMPS.....	11
2.6 FORMATOS DE SINALIZAÇÃO.....	14
2.7 CONCLUSÕES.....	20
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>21</b>
<b>3 ESTAÇÕES COMERCIAIS DE FM - A FONTE INTERFERIDORA.....</b>	<b>21</b>
3.1 ESTAÇÕES COMERCIAIS DE FM.....	21
3.2 ALOCAÇÕES DE FREQUÊNCIA.....	21

3.3	CLASSIFICAÇÕES DAS ESTAÇÕES.....	22
3.4	TRANSMISSORES.....	23
3.5	CARACTERÍSTICAS DOS SINAIS MODULADOS EM FM.....	24
3.6	A ESTAÇÃO DE FM COMO FONTE INTERFERIDORA.....	29
3.7	CONCLUSÕES.....	32
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>33</b>
<b>4 RUÍDO E INTERFERÊNCIA EM SISTEMAS CELULARES.....</b>		<b>33</b>
4.1	RUÍDO E INTERFERÊNCIA.....	33
4.2	CONSEQUÊNCIAS DE INTERFERÊNCIA PARA O TRÁFEGO DE VOZ.....	37
4.2.1	GRAU DE SERVIÇO E PERDA DE TRÁFEGO DO SISTEMA CELULAR SOB INTERFERÊNCIA.....	38
4.2.2	PERDA DE RECEITA DEVIDO À INTERFERÊNCIA EM CANAIS DE VOZ.....	44
4.2.3	CONCLUSÕES PARA INTERFERÊNCIA EM CANAIS DE VOZ.....	47
4.3	CONSEQUÊNCIAS DE INTERFERÊNCIA PARA O TRÁFEGO DE SINALIZAÇÃO.....	48
4.3.1	DEGRADAÇÃO DO TRÁFEGO DE SINALIZAÇÃO DO SISTEMA CELULAR SOB INTERFERÊNCIA.....	48
4.3.2	MÉTODO PARA IDENTIFICAR A PROBABILIDADE DE INSUCESSO NA ORIGEM E TERMINAÇÃO DE CHAMADAS.....	50
4.4	CONCLUSÕES.....	61
<b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>63</b>
<b>5 ESTUDO DE CASO: JOINVILLE MORRO.....</b>		<b>63</b>
5.1	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA CELULAR E DA ESTAÇÃO FM.....	63
5.2	O PROBLEMA.....	63
5.3	DEGRADAÇÃO DO SISTEMA DEVIDO À INTERFERÊNCIA NOS CANAIS DE TRÁFEGO DE VOZ.....	67
5.3.1	GRAU DE SERVIÇO.....	67
5.3.2	PERDA DE TRÁFEGO.....	69
5.3.3	PERDA DE RECEITA.....	70
5.4	DEGRADAÇÃO NO SISTEMA DEVIDO À INTERFERÊNCIA NO CANAL DE TRÁFEGO DE SINALIZAÇÃO.....	72
5.4.1	A FUNÇÃO DE PROBABILIDADE DO SINAL E DO RUÍDO NO CANAL DE CONTROLE REVERSO (RECC).....	73

5.4.2 A FUNÇÃO DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE DA RAZÃO SINAL-RUÍDO.....	75
5.4.3 A PROBABILIDADE DE ERRO DE BIT EM FUNÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DA SNR.....	76
5.4.4 A PROBABILIDADE DE ERRO DE CADA CAMPO DA MENSAGEM DO CANAL RECC.....	77
5.4.5 A PROBABILIDADE DE ERRO DA MENSAGEM DO CANAL RECC.....	78
5.5 CONCLUSÕES.....	79
 <b>6 CONCLUSÃO.....</b>	 <b>82</b>
 <b>7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	 <b>85</b>

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Especificações do sistema AMPS.....	12
TABELA 2.2	Número dos canais e frequências.....	13
TABELA 3.1	Classificação das estações FM, potências e alturas de torre.....	23
TABELA 3.2	Estações de FM potenciais para interferência em sistemas celulares AMPS.....	31
TABELA 5.1	Tráfego perdido por interferência em um dia.....	71

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Aspectos de um sistema celular.....	8
FIGURA 2.2	Formato da mensagem no canal de controle reverso.....	17
FIGURA 2.3	Formato da palavra A que compõe a mensagem no canal de controle reverso.....	19
FIGURA 3.1	Diagrama de blocos de um transmissor de FM típico.....	24
FIGURA 3.2	Largura de faixa ocupada por uma portadora de rádio difusão FM Comercial.....	28
FIGURA 3.3	Largura de faixa ocupada por uma portadora de rádio.....	30
FIGURA 4.1	Fila de Markov, processo M/M/C/C.....	39
FIGURA 4.2	Probabilidade de bloqueio de uma célula com 19 canais em função do tráfego oferecido para as situações: sem perda de canais; perda de 3 canais; perda de 5 canais e perda de 7 canais. ....	42
FIGURA 4.3	Tráfego escoado em função do tráfego oferecido em uma célula de 19 canais sob condições de interferência.....	43
FIGURA 4.4	Perfil de tráfego oferecido típico de uma célula com 19 canais.....	46
FIGURA 4.5	Formato da mensagem no canal RECC.....	55
FIGURA 4.6	Probabilidades de erro de: bit, bit com múltipla repetição, palavra codificada com repetição de bit, DCC e mensagem do canal RECC, para detecção não coerente de um sistema FSK.....	57
FIGURA 4.7	Probabilidade de erro de bit para recepção FSK não-coerente e probabilidade de perda de detecção da palavra de sincronismo para vários valores de k.....	59
FIGURA 4.8	Probabilidade de erro de mensagem no canal RECC para diferentes condições de erro na palavra de sincronismo.....	60
FIGURA 5.1	Espectro de frequência com interferência da estação FM e percebido pelo receptor da estação celular.....	64
FIGURA 5.2	Espectro de frequência sem interferência percebido pelo receptor da estação celular.....	65
FIGURA 5.3	Espectro de frequências percebido pelo receptor da estação celular com a portadora da estação FM ativada sem modulação.....	66
FIGURA 5.4	Tráfego oferecido para a Célula JVE0.....	68



FIGURA 5.5	Perda de tráfego escoado em uma célula de 56 canais com perda de 6 canais....	70
FIGURA 5.6	Histograma de ocorrências de valores medidos de potência; (a) potência dos acessos no canal RECC; (b) potência do ruído provindo da estação FM.....	74
FIGURA 5.7	Diagrama da função densidade de probabilidade da razão sinal-ruído .....	75

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO

A degradação de desempenho de um sistema celular móvel, devido à interferência provocada por estações comerciais de FM (frequência modulada) traz sérias consequências às companhias operadoras de sistemas celulares, tanto na qualidade do serviço percebida pelos clientes quanto na perda de capacidade de escoamento de tráfego e no volume de receita. A proposta deste trabalho consiste em analisar as variáveis que exercem influência na qualidade do sistema celular segundo o padrão AMPS (Advanced Mobile Phone Service) e avaliar a degradação provocada por interferências externas.

Segundo LEE (1990) existem três categorias para especificar critérios de desempenho de um sistema celular: (1) qualidade de voz; (2) qualidade de serviço e (3) facilidades especiais. Qualidade de voz refere-se à fidelidade da voz na comunicação, ou seja, deve apresentar uma voz clara, livre de distorção e ruído. A categoria qualidade de serviço é representada pelos itens área de cobertura do sistema, grau de serviço e número de quedas de chamadas. As facilidades especiais relacionam-se com os serviços suplementares oferecidos junto ao serviço de voz, como chamada em espera, conferência a três dentre outros.

Para KUCAR apud GIBSON (1996) a primeira e mais importante medida da qualidade do serviço deve ser a satisfação dos clientes.

Interferências provocadas por fontes externas, como as estações comerciais de FM, têm consequência direta no grau de serviço, pois afetam as comunicações processadas pela interface ar do sistema. Sendo assim, são elementos degenerativos do desempenho do sistema. Além disso, os efeitos da interferência são sentidos pelos clientes como um insucesso quando no estabelecimento de uma chamada.

As estações de FM operam na faixa de frequência de 88,1 a 107,9 MHz, com uma largura de faixa utilizável de 200 kHz. Dividem-se em classes conforme sua potência efetivamente radiada que pode variar de algumas centenas de watts até 100 kW. Para atingir tais níveis de potência de saída, as estações transmissoras FM empregam dispositivos

amplificadores não lineares que produzem sinais harmônicos. Logo, vão existir sinais harmônicos posicionados na faixa utilizada pela telefonia celular, implicando em interferências e conseqüentemente degradação da qualidade do sistema.

## **1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO**

### **1.1.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral do trabalho consiste em avaliar a degradação de um sistema celular AMPS, operando em uma determinada região, provocada por interferência no espectro de frequência gerada por emissoras de FM, degradação esta representada pelo aumento da probabilidade de bloqueio devido à indisponibilidade de canais de voz e pela diminuição da probabilidade de sucesso no estabelecimento de uma chamada afetada pela interferência no canal de controle.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Como objetivos específicos têm-se:

1. Descrever as características de um sistema celular AMPS.
2. Descrever as características e o comportamento de sinais gerados por emissoras de FM.
3. Mostrar como uma estação de FM pode interferir no espectro de frequências de operação do sistema celular.
4. Abordar os ruídos e sinais interferentes para um sistema celular.
5. Mostrar os efeitos no sistema celular sob interferência no canal de controle e canal de tráfego de voz.
6. Apresentar uma forma de avaliar a degradação do grau de serviço do sistema sob interferência no espectro de frequência de canais de voz.
7. Apresentar uma forma de medir a degradação do grau de serviço do sistema sob interferência no espectro de frequência de canais de controle.

8. Utilizar este método de medida da degradação da qualidade do sistema em um caso prático onde foi constatado que ocorre interferência na estação rádio base de Joinville Morro provocada pela rádio Jovem Pan.

## **1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO**

Este trabalho, aplicado a casos práticos, possibilita avaliar o grau de serviço do sistema sob interferência, situação comum dos sistemas celulares que operam em regiões próximas a emissoras de FM, possibilitando assim determinar a perda de receita da operadora do sistema celular. Além disso, fornece subsídios para a tomada de decisão quanto à solução do problema, servindo ainda como diretiva para as equipes de planejamento do sistema nas questões de alocação das estações rádio base.

## **1.3 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO**

COX (1996) enfatiza que o segmento de comunicações pessoais sem fio é, por qualquer tipo de medida, o que mais cresce no mundo em telecomunicações. O autor acrescenta que entre as diferentes mudanças que estão ocorrendo em nossos paradigmas, talvez o principal elemento é a mudança das comunicações ponto a ponto fixas com fio para comunicações pessoa a pessoa móveis sem fio. Dentro deste contexto de grande destaque dos sistemas de comunicações móveis ao redor do mundo é evidente a importância de se conhecer os fenômenos que ocasionam degenerações de desempenho.

Com o advento dos sistemas celulares de segunda geração, caracterizado pelo emprego de técnicas de modulação digital na interface ar, espera-se que a base instalada AMPS seja reduzida. Apesar disso, o número de usuários que utilizam o sistema no Brasil é em torno de 6 milhões. Além disso, as operadoras da banda B, que introduziram seus sistemas a partir de 1998 no Brasil, lançaram mão de uma parte dos recursos de comunicação da rede conforme o padrão AMPS, com o objetivo de possibilitar o atendimento de qualquer usuário visitante independente da tecnologia celular empregada por sua operadora de origem.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 2 aborda os sistemas celulares, em especial o padrão AMPS, descrevendo os objetivos buscados na concepção do padrão. Além disso, descreve as características do sistema, as especificações técnicas da interface ar e a estrutura de sinalização.

O Capítulo 3 descreve as estações comerciais de FM como a fonte interferidora do sistema celular. Para isso, é feita uma introdução sobre as estações FM, relatando suas características, alocação de frequências e as classificações utilizadas. Em seguida, uma análise do sinal modulado em FM é feita de modo a caracterizar o sinal interferente percebido pelo sistema celular. Por fim, é apresentada uma relação de estações FM com possibilidades de interferir nos sistemas celulares.

O Capítulo 4 aborda os ruídos e interferências inerentes aos sistemas celulares, em especial para o padrão AMPS. A interferência provinda das estações FM é conceituada e uma análise da consequência desta interferência para o sistema celular é realizada em dois aspectos. O primeiro referente ao tráfego de voz. O segundo relativo ao tráfego de sinalização, ou seja, o fluxo de controle entre a rede celular e os usuários do sistema. Para as duas análises, um método é proposto para avaliar a degradação do sistema celular.

O Capítulo 5 faz um estudo de caso empregando o método discutido no Capítulo 4. O estudo refere-se a um problema real de interferência provocado pela estação FM Jovem Pan na cidade de Joinville, SC, Brasil em uma estação celular da TIM Telesc Celular.

Por fim, o Capítulo 6 traz as conclusões referentes à investigação realizada.

## **CAPÍTULO 2**

### **2 SISTEMA MÓVEL CELULAR**

#### **2.1 PADRÃO AMPS**

O sistema AMPS (Advanced Mobile Phone Service) foi concebido pelos laboratórios AT&T Bell na década de 70 e, devido à reputação de excelência técnica e influência que gozava a AT&T na época, seu padrão foi largamente utilizado, servindo ainda de base para os sistemas TACS (Total Access Cellular System) Britânico e o MCS-L1 (Mobile Cellular System) Japonês.

O primeiro sistema AMPS foi instalado na área urbana e suburbana da cidade de Chicago no final de 1983 pela Ameritech. Até 1989 era utilizado uma faixa de 40 MHz dividida em duas bandas, A e B, de forma a permitir que duas operadoras competissem no mesmo mercado. Com o crescimento da demanda, a partir de 1989, o FCC (Federal Communications Commission) autorizou o uso de mais 10 MHz. Desde então, esta estrutura de distribuição de frequências tem sido usada até os dias de hoje.

Este padrão é empregado no Brasil por todas as operadoras da banda A. As operadoras da banda B, mesmo que iniciada sua operação já na época dos sistemas celulares de segunda geração, utilizam uma parte dos canais conforme o padrão AMPS. Isto para atender um grande número de usuários visitantes que possuem aparelhos analógicos.

O padrão AMPS tem suas especificações referentes às estações móveis e estações rádio base padronizadas pelo EIA/TIA-553, aprovado em 19 de abril de 1989.

## 2.2 PRINCIPAIS OBJETIVOS DO SISTEMA AMPS

Os principais objetivos buscados na concepção do sistema celular AMPS, segundo YOUNG (1979), foram:

a) Grande capacidade de assinantes: ou seja, a capacidade de atender uma grande quantidade de tráfego, para milhares de usuários móveis dentro de uma determinada área de serviço, com o uso de um número limitado de canais.

b) Eficiência no uso do espectro: o sistema deve permitir o uso adequado do espectro para atender suas necessidades de tráfego sem requerer mais largura de faixa.

c) Compatibilidade nacional: este objetivo foi imposto pelo FCC (Federal Communication Commission) para que o sistema proporcione o mesmo padrão de serviço e de operação, de forma que uma estação móvel possa ser utilizada em qualquer outro sistema AMPS.

d) Disponibilidade nacional de serviço: este objetivo está relacionado com a capacidade de *roaming*, ou seja, a possibilidade do usuário permanecer em serviço mesmo estando numa área atendida por outra empresa ou outro sistema.

e) Adaptabilidade à densidade de tráfego: o sistema deve ser capaz de lidar com as características de tráfego, como diferentes distribuições espaciais de tráfego e a variabilidade com o tempo.

f) Provimento de serviço para aparelhos veiculares e aparelhos portáteis: a idéia inicial era conceber o sistema para uso veicular. Apesar disso, buscou-se compatibilizar o sistema para uso de aparelhos portáteis.

g) Provimento de serviço telefônico convencional e serviços especiais, inclusive despacho: além dos serviços convencionais de voz, o sistema AMPS deve possibilitar serviços especializados como despacho e facilidades especiais como discagem abreviada.

h) Oferecimento de qualidade do serviço telefônico: buscou-se proporcionar a mesma qualidade de áudio dos sistemas de comunicação terrestres. Mesmo que as dificuldades relativas ao canal de comunicação não fossem as mesmas, o objetivo foi prover uma qualidade de voz livre de ruído e distorção. Além disso, o grau de serviço, ou seja, a probabilidade de bloqueio de chamada não deveria exceder os valores das redes telefônicas convencionais, isto é, da ordem de 2%.

i) Custo acessível : procurou-se fazer o serviço acessível para grande parte do público e do mundo dos negócios.

## 2.3 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA CELULAR AMPS

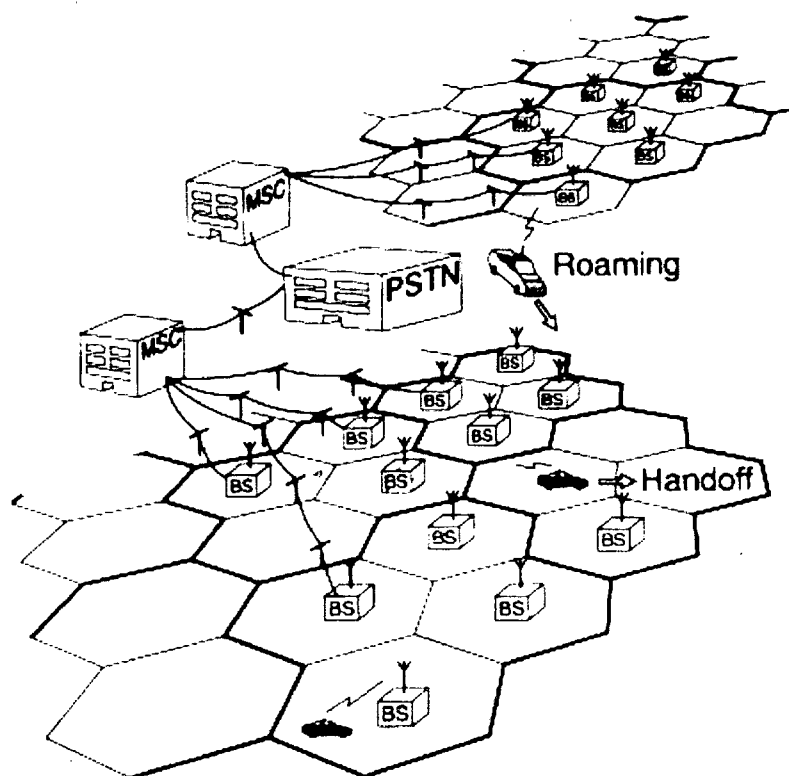
As principais características de um sistema celular estão relacionadas abaixo:

- a) É um sistema limitado por interferência;
- b) Serve uma alta capacidade de assinantes;
- c) A disponibilidade espectral de frequência é um fator limitante;
- d) Utiliza o recurso de reuso de frequência;
- e) Requer transmissores de baixa potência (de 1 a 50 W) alocados em baixas alturas ( de 6 a 100 m);
- f) Divide a área de serviço em células de cobertura menor com raio de 2 a 16 km, sendo geralmente cada célula equipada com 15 a 75 canais;
- g) Permite uma expansão modular;
- h) Permite hand-off.

A concepção básica de um sistema celular é o reuso de frequência. Para isto, divide-se o total de canais disponíveis para o sistema em um número determinado de grupos de canais. Cada área é servida por um grupo de canais. Este grupo pode ser usado para servir outra área suficientemente afastada de forma a manter a *interferência cocanal* dentro de limites aceitáveis. A área servida por um grupo é chamada de *célula*. Células que utilizam o mesmo grupo de canais são chamadas *co-células*. A cobertura de uma área é provida por uma estação base. As células podem ser alocadas de uma forma modular e, em teoria, podem aumentar a



capacidade indefinidamente. O conjunto de células contíguas que juntas possuem todos os canais disponíveis para o sistema sem repetição é denominado *cluster*.



**FIGURA 2.1** Aspectos de um sistema celular

O tamanho da célula é um parâmetro definido no planejamento da rede, pois depende principalmente da demanda de tráfego da região em questão.

Em um sistema celular, o usuário pode se mover durante a conversação, ocasionando que ele passe de uma célula para outra. Neste caso a ligação não pode ser interrompida, logo, uma mudança de canal para uma nova estação base e um redirecionamento da chamada no comutador da central são necessários. Este processo é conhecido como *hand-off* ou *hand-over*. O processo de *hand-off* é iniciado em duas ocasiões: quando o nível de potência recebido pela estação base cai abaixo de um certo limite ou quando a razão sinal-ruído está abaixo de um certo limiar. O processo de monitorar a chamada, executada pela estação base, é chamado *locating*. O processo de busca de um usuário móvel para o estabelecimento de uma chamada destinada para este usuário é chamada de *paging*. O pedido de uma chamada feita pelo usuário móvel é denominada *access*. Quando o usuário é atendido por uma área de serviço diferente da qual ele foi habilitado, diz-se que ele está na condição de *roaming*.

## 2.4 COMPONENTES BÁSICOS DO SISTEMA CELULAR AMPS

Existem quatro elementos básicos num sistema celular: Estação Móvel, Estação Base, Central de Comutação e Controle e Rede Telefônica Pública. A Figura 2.1 ilustra os componentes do sistema.

### 2.4.1 ESTAÇÃO MÓVEL

A estação móvel (EM) consiste de dois elementos: a parte de telefone e a parte de rádio. Ela provê a interface entre o usuário e a estação base. Além de comunicação de voz, a EM trata funções de controle e sinalização, usualmente executada por um microprocessador. A unidade móvel é capaz de sintonizar qualquer canal na faixa de frequência alocada para o sistema. Cada canal combina um par de frequências, espaçadas de 45 MHz, para uma conversação bidirecional. As mensagens de controle são transmitidas numa forma digital, através de modulação FSK, e podem ser enviadas tanto pela EM quanto pela estação base, sendo que esta comunicação pode ser transmitida no canal de controle ou no canal de voz, dependendo da circunstância e ação a ser executada.

As Estações Móveis são classificadas em três classes de acordo com a máxima potência efetivamente radiada (ERP) com relação ao dipolo de meia onda. A ERP nominal para cada classe de transmissor de estação móvel é:

Classe I	6 dBW (4,0 Watts)
Classe II	2 dBW ( 1,6 Watts)
Classe III	-2 dBW (0,6 Watts)

O transmissor da estação móvel deve ser capaz de reduzir a potência em passos de 4 dB em resposta a comandos enviados pela estação base. O controle do nível de potência possui uma faixa de controle dividida em 8 níveis, sendo que, o nível “7” representa o menor valor de potência, ou seja, igual à -22 dBW para todas as três classes e o nível “0” representa o maior valor que equivale à 6 dBW.

Esta facilidade foi implementada para evitar níveis de potência muito altos na entrada do receptor da estação base, situação que provoca produtos de intermodulação em níveis indesejáveis. Além disso, o controle de potência é usado para diminuir interferência cocanal e canal adjacente.

#### **2.4.2 ESTAÇÃO BASE**

As estações base realizam a interface entre as unidades móveis localizadas dentro da sua célula e a rede celular. Elas são interligadas com as centrais de comutação e controle através de enlaces dedicados de comunicação, podendo ser por enlaces de fibra óptica, enlaces rádio, cabo coaxial, conexões bifilares ou uma combinação destas técnicas. As estações base são constituídas de dois elementos: a parte de rádio e a parte de controle. A parte de rádio compreende os transmissores, receptores, torres e sistema radiante. A parte de controle é composta pelas unidades microprocessadoras que são responsáveis pelo controle, monitoramento e supervisão das chamadas. Além disso, têm funções específicas como o monitoramento do nível de sinal para iniciar processos de hand-off e supervisão de níveis de interferência.

O sistema radiante das estações base usa a técnica de diversidade espacial na parte de recepção com a finalidade de minimizar os efeitos provocados pelo desvanecimento rápido, característica do ambiente de rádio dos sistemas de comunicações móveis.

#### **2.4.3 CENTRAL DE COMUTÇÃO E CONTROLE**

A central de comutação e controle CCC é uma central telefônica especialmente projetada para serviços de rádio celular. É o elemento de coordenação central de toda a rede celular, pois administra todas as estações base dentro de sua área de controle, ou seja, controla um aglomerado celular. A CCC estabelece a interface com a rede de telefonia fixa e permite aos usuários os mesmos serviços e facilidades adicionais oferecidos pela rede convencional.

Segundo YACOUB (1993) o número de células conectadas ou controladas por uma CCC varia de acordo com a necessidade. Uma CCC pode ser responsável por uma grande área metropolitana ou por um número de pequenas cidades vizinhas. A área servida por uma CCC é conhecida como *área de serviço*. O usuário móvel dentro de sua área de serviço é um usuário *home*. É possível, entretanto, que um usuário saia de sua área de serviço e entre em outra área. Neste caso ele é chamado de *roamer*.

A conexão com as estações base requer, além dos circuitos para comunicação de voz, um caminho para comunicação de dados. Este *link* é usado para a troca de informações entre os processadores da CCC e as unidades processadoras das estações base, e é necessário para que a CCC execute as funções de *paging*, *locating* e *hand-off*. A interligação da CCC com a rede fixa se dá por linhas PCM E1 ou T1.

Assim como qualquer outra central telefônica as CCC executam funções de sinalização entre centrais, tarifação, funções de comutação, conversão A/D para os circuitos de áudio, etc..

#### **2.4.4 REDE TELEFÔNICA PÚBLICA**

A rede telefônica pública (RTP) trata as CCC como uma central telefônica fixa comum. A RTP interligada às CCC possibilita que todos os usuários, tanto da rede móvel quanto da rede fixa, possam falar entre si.

### **2.5 ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA AMPS.**

Nesta seção serão abordadas apenas algumas especificações e termos relevantes ao escopo deste trabalho. As principais especificações do sistema AMPS são apresentadas na Tabela 2.1.

**TABELA 2.1** Especificações do sistema AMPS

Parâmetros	AMPS
Freq. TX., MHz	
Estação Base	869-894
Estação Móvel	824-849
Método de Múltiplo acesso	FDMA
Modo Duplex	FDD
Largura de faixa do Canal, kHz	30,0
Canal de Tráfego por Canal de RF	1
Total de Canais de Tráfego	832
Voz	Analógica
Compressão Silábica	2:1
Modulação	PM
Desvio de Pico da Portadora, kHz	$\pm 12$
Controle	Digital
Modulação	FSK
Forma de Onda da Banda Básica	Manchester.
Desvio de Pico da Portadora, kHz	$\pm 8$
Taxa do Canal, kb/s	10,0
Código de Canal	BCH
Base→Móvel	(40, 28)
Móvel→base	(48, 36)

Fonte: 4U Communications Research Inc., 1995.02.23-22:39, updated: 1994.10.31

O sistema AMPS foi concebido de forma a permitir que duas operadoras possam prestar o serviço numa mesma região. Logo, a faixa de frequência reservada para o serviço celular, que compreende uma faixa de 50 MHz, foi dividida em duas bandas denominadas *banda A* e *banda B*, com 25 MHz cada. Como os canais, tanto os de voz quanto os de controle, têm uma largura de faixa limitada em 30 kHz, cada banda tem disponível 416 canais sendo que 21 deles são reservados para canais de controle e os outros 395 são usados como canais de tráfego de voz. A alocação destes canais no espectro de frequência está mostrada na Tabela 2.2.

**TABELA 2.2** Número dos canais e frequências

Banda	MHz	Número de Canais	Número do Canal	Frequência Central de Transmissão da Estação Móvel [MHz]	Frequência Central de Transmissão da Estação Base [MHz]
<i>A''</i>	1	33	991	824,040	869,040
			⋮	⋮	⋮
			1023	825,000	870,000
<i>A</i>	10	333	1	825,030	870,030
			⋮	⋮	⋮
			333	834,990	879,990
<i>B</i>	10	333	334	835,020	880,020
			⋮	⋮	⋮
			666	844,980	889,980
<i>A'</i>	1,5	50	667	845,010	890,010
			⋮	⋮	⋮
			716	846,480	891,480
<i>B'</i>	2,5	83	717	846,510	891,510
			⋮	⋮	⋮
			799	848,970	893,970

A frequência central de transmissão em MHz correspondente ao número do canal (expresso como  $N$ ) é calculado como a seguir.

Transmissor	Número do Canal	Frequência Central MHz
Estação Móvel	$1 \leq N \leq 799$	$0,03N + 825,000$
	$990 \leq N \leq 1023$	$0,03(N - 1023) + 825,000$
Estação Base	$1 \leq N \leq 799$	$0,03N + 870,000$
	$990 \leq N \leq 1023$	$0,03(N - 1023) + 870,000$

Abaixo estão listados alguns termos e suas funções retirados da norma EIA/TIA-553:

1. *Control channel* - Um canal usado para a transmissão digital de informações de controle da estação base para a estação móvel ou vice-versa.
2. *Forward control channel (FOCC)* - Um canal de controle usado para transmissão da estação base para a estação móvel.
3. *Forward voice channel (FVC)* - Um canal de voz usado para transmissão da estação base para a estação móvel.

4. *Reverse control channel (RECC)* - Um canal de controle usado para transmissão da estação móvel para a estação base.
5. *Reverse voice channel (RVC)* - Um canal de voz usado para transmissão da estação móvel para a estação base.
6. *Access channel* - Um canal de controle usado pela estação móvel para acessar o sistema de forma a requisitar um serviço.
7. *Paging channel* - Um canal de controle direto que é usado para busca de uma estação móvel ou envio de ordens.
8. *Voice channel* - Um canal no qual uma conversação de voz ocorre, no qual também podem ser transmitidas breves mensagens digitais da estação base para a estação móvel ou vice-versa.
9. *Registration* - O processo pelo qual a estação móvel se identifica para a estação base de forma a indicar que está ativa no sistema.

No sistema celular AMPS podem haver diferentes configurações para canais de controle. Em princípio, os canais usados para sinalização e controle do sistema são divididos em três grupos: (1) *control channel*, (2) *paging channel* e (3) *access channel*. Pode ser usado um rádio para efetuar a tarefa de *access channel* e outro exclusivo para *paging channel*. De outro modo, pode-se ter um rádio que execute todas as funções de controle e sinalização.

Neste trabalho será adotada a configuração em que o canal de controle abrange tanto o *access* e o *paging channel*. As transmissões que ocorrem no canal de controle no sentido estação base para estação móvel são consideradas mensagens transmitidas no *Forward control channel*. Já no sentido contrário, ou seja, da estação móvel para a estação base, são consideradas mensagens enviadas no *Reverse control channel*.

## 2.6 FORMATOS DE SINALIZAÇÃO

A sinalização é um mecanismo necessário para o correto funcionamento do sistema celular. Ocorre entre a estação base e todas as estações móveis que são servidas pela célula.

Quanto à forma do sinal que representa a mensagem a ser enviada o formato de sinalização pode ser classificado de duas maneiras:

a) **Tom de áudio** - São tons alocados em regiões acima da banda destinada à conversação no canal de voz. O sistema AMPS utiliza o Tom de Sinalização (TS) e o Tom de Supervisão de Áudio (TAS).

- *Tom de Sinalização (TS)* é um tom de 10 kHz e produz um desvio de frequência nominal de 8 kHz na portadora. É usado somente no sentido estação móvel para estação base, e a duração do tom é usado para indicar as várias mensagens como desconexão de chamada do móvel, estado de campanha, processo de hand-off e “flashing” (pedido de uma nova chamada durante uma conversação).
- *Tom de Supervisão de Áudio (TAS)* pode ser um dentre três frequências: 5970, 6000, ou 6030 Hz. Este tom é enviado constantemente pela estação base e ao ser detectado pela estação móvel ela deve filtrá-lo, e modular a portadora do canal de voz com este tom. O TAS tem a finalidade de supervisionar a qualidade da transmissão da conversação no canal de voz, assim como indicar a ocorrência de *fading*, perda do enlace por algum motivo e interferência cocanal. O uso de três diferentes tons é necessário para implementar um esquema de reuso de frequência, onde uma célula de um cluster utiliza um tom e as células com os mesmos canais nos clusters vizinhos utilizarão os dois outros tons a fim de tornar a supervisão de interferência cocanal o mais confiável possível.

b) **Trem de Dados** - São mensagens que carregam uma quantidade maior de informação. São na sua forma natural digitais e modulam a portadora no modo FSK. As mensagens enviadas nesta forma ocorrem no canal de controle e no canal de voz em ambos os sentidos. São usados para designar várias operações como: busca ao usuário, resposta à busca, origem de chamada, ordens, confirmação de ordens, controle de potência do móvel, hand-off, informações do sistema, estado do canal de controle, identificação do sistema, registro do móvel, informações de registro, condição de sobrecarga, etc..

Utilizando este formato de comunicação, existem duas categorias de mensagens de sinalização: aquelas enviadas através de um feixe contínuo de bits constante e aquelas enviadas como uma rajada de bits.



Na primeira categoria incluem-se as buscas de usuários, informações sobre as condições do sistema e várias mensagens com funções de cabeçalho, combinadas num único feixe de bits que é transmitido continuamente em um canal de controle dedicado, no sentido da estação base para as estações móveis.

A segunda categoria inclui: as mensagens para o processo de handoff, enviadas no canal de voz pela estação base, e os pedidos de acesso para chamadas enviadas pelas estações móveis em canais apropriados de acesso.

A sinalização por trem de dados é realizada a uma taxa de  $10 \text{ kbps} \pm 1 \text{ bps}$ . Segundo LEE (1990), esta taxa foi especificada de forma a evitar interferência intersimbólica. A forma do pulso empregada é o código bifásico *Manchester*, no qual cada nível lógico “1” é codificado no par 0,1 e cada nível lógico “0” é codificado no par 1,0.

A vantagem deste código, segundo FISHER (1979), reside no fato que o pico do espectro de potência para transmissão de dados é bem acima da banda de voz, de modo que esta separação, após o discriminador do receptor FM, facilita distinguir voz e dados. Isto facilita o uso da técnica *Blank and Burst*, ou seja, a transmissão de voz é interrompida (*Blank*) por 200 ms para permitir a recepção de uma rajada (*burst*) de dados.

ARREDONDO (1979) acrescenta que a função de sincronismo do receptor é facilitada com o emprego do código Manchester devido à presença de transições de bit. Mesmo que o bit transmitido seja 1 ou 0, haverá sempre transições do par que representam estes bits, de modo que o receptor recebe uma taxa constante de transições. O código Manchester é aplicado tanto no canal de controle quanto no canal de voz para funções de sinalização.

O formato de mensagens é definido para os seguintes canais :

*Forward control channel (FOCC).*

*Forward voice channel (FVC).*

*Reverse control channel (RECC).*

*Reverse Voice channel (RVC).*

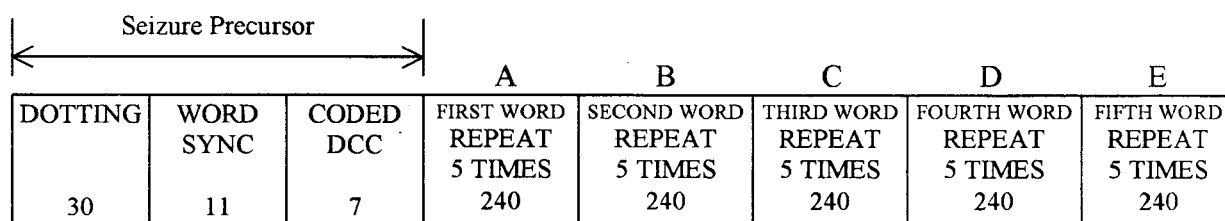
*Access channel.*

*Paging channel.*

Apesar do formato das mensagens ser especificado para as comunicações de mensagens entre a estação base e a estação móvel, ele difere conforme o canal pelo qual será efetuada a transmissão.

Na análise de interferência no canal de controle abordado neste trabalho, o canal de controle reverso (RECC) é o mais importante, pois será este que sofrerá a interferência provocada por estações de FM comerciais. Por este motivo faz-se necessária a descrição do formato de sinalização, do código empregado e das funções do sistema que utilizam este canal.

O formato do trem de bits no canal de controle reverso é mostrado na Figura 2.2



**FIGURA 2.2** Formato da mensagem no canal de controle reverso

Todas as mensagens começam com o “Seizure Precursor” do RECC que é composto por um cabeçalho com 30 bits (dotting), uma palavra de sincronismo (Word sync) de 11 bits (11100010010) e por último uma sequência de 7 bits que representa o “digital color code” codificado.

Os trinta bits do dotting são utilizados para iniciar a função de sincronismo de símbolo, ou seja, precisa-se gerar um sinal de relógio (clock) no receptor que tenha suas transições ocorrendo no mesmo momento que os símbolos recebidos. Esta sequência de bits é percebida pelo receptor como um tom de 5 kHz sinalizando o início de uma nova mensagem e disparando o processo de sincronismo de fase do sinal de relógio que passará a ser atualizado por um circuito PLL (Phase Lock Loop).

A palavra de sincronismo é empregada para a função de sincronismo de quadro (frame), ou seja, o receptor precisa saber quando começam as palavras codificadas da mensagem. Esta palavra de sincronismo é conhecida como uma sequência de Barker de

comprimento igual a 11. Segundo SKLAR (1988), devido à propriedade das seqüências de Barker possuir correlação máxima de lóbulo lateral (sidelobe) igual à unidade, esta seqüência mantém baixa a probabilidade de falsa detecção e requer uma operação de correlação de baixa complexidade. A correlação de lóbulo lateral é definida como a correlação entre a palavra código e sua réplica deslocada no tempo.

Ainda segundo SKLAR (1988) para se efetuar a função de sincronismo em sistemas digitais é preciso três níveis de sincronismo: sincronismo de fase, de símbolo e de quadro. O autor acrescenta que sistemas que utilizam técnicas de modulação não coerente necessitarão, tipicamente, de sincronismo de símbolo e de quadro.

ARREDONDO (1979) mostra que a recepção do sinal modulado em FSK, no AMPS, é feita através de detecção por discriminador. Por isso, representa uma recepção não coerente. Logo, a função de sincronismo de símbolo e de quadro para as comunicações no canal RECC são desempenhadas pelas seqüências de dotting e palavra de sincronismo, respectivamente.

O digital color code é uma informação associada ao número do canal de controle utilizado para o acesso, de modo a possibilitar a estação base identificar se a mensagem que está chegando vem de um usuário dentro de sua célula ou refere-se a um usuário em uma célula cocanal, na qual, por motivo de interferência, deve ser descartada. Desempenhando a mesma função do TAS no canal de voz.

A palavra do DCC é formada por dois bits, para representar os 4 diferentes códigos possíveis, acrescida de 7 bits de paridade. O código empregado para o DCC é um código de bloco (7,2,4) com uma distância mínima igual a 4.

Cada palavra de informação contém 48 bits. Como cada palavra é repetida 5 vezes o bloco da palavra contém 240 bits. De cada palavra de informação, 36 bits são de informação e os outros 12 bits de paridade, introduzidos conforme o código BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) (48, 36). Este código tem uma distância de Hamming igual a 5 e representa uma versão reduzida do código BCH (63, 51; 5).

O código BCH (48, 36) é um código de bloco linear sistemático e tem a capacidade de corrigir um erro e detectar dois erros. O polinômio gerador para o código BCH (48, 36, 5) é :

$$g_B(x) = X^{12} + X^{10} + X^8 + X^5 + X^4 + X^3 + X^0$$

A função de cada palavra A, B, C, D, e E na Figura 2.2 é descrita a seguir:

- WORD A** Palavra de endereço abreviado. Identifica a estação móvel. É sempre enviada.
- WORD B** Uma palavra de endereço estendido. É enviada a pedido da estação base ou em uma situação de *roaming*.
- WORD C** Uma palavra do número de série. Cada unidade móvel possui um único número de série fornecido pelo fabricante. É usado para validar a autenticidade do usuário.
- WORD D** A primeira palavra do número chamado.
- WORD E** A segunda palavra do número chamado.

O formato da primeira palavra de informação está mostrado na Figura 2.3:

F	NAWC	T	S	E	RSVD	SCM		
1	3	1	1	1	1	4	24	12 bits

**FIGURA 2.3** Formato da palavra A que compõe a mensagem no canal de controle reverso

Na Figura 2.3 tem-se:

- F** Campo de indicação da primeira palavra, 1-primeira palavra, 0-palavras subseqüentes.
- NAWC** Número de palavras adicionais a vir.
- T** Campo T, 1-indica uma origem, 0-indica uma resposta a busca.
- S** Campo S, 1-enviado a palavra do número de série, 0-caso contrário.
- E** Campo do endereço estendido, 1-enviado a palavra de endereço estendido, 0-caso contrário.
- SCM** Campo da classe da estação móvel.
- RSVD** Campo reservado.

Os tipos de mensagens a ser transmitidos pelo canal de controle reverso RECC são:

- *Mensagem de resposta a busca*. Quando uma estação móvel recebe uma busca enviada pela estação base; a estação móvel responde a esta busca, ou seja, ocorre na ocasiões de chamadas terminadas para o usuário móvel.

- *Mensagem de origem*. O usuário móvel origina uma chamada.

- *Mensagem de confirmação de ordem*. A estação móvel responde a uma ordem da estação base.

- *Mensagem de ordem*. A estação móvel ordena uma tarefa a ser executada pela estação base e a central de comutação e controle.

## 2.7 CONCLUSÃO

A abordagem sobre o sistema celular padrão AMPS feita neste capítulo teve a intenção de relacionar os objetivos buscados na concepção do padrão, as características básicas do sistema celular, os elementos do sistema e, em mais detalhes, os formatos de sinalização, os códigos empregados, as estruturas de mensagens de sinalização, os aspectos de sincronismo e os tipos de mensagens. Pois, todo este conjunto de características técnicas será importante na investigação da degradação de desempenho do sistema celular operando sob interferência.

## **CAPÍTULO 3**

### **3 ESTAÇÕES COMERCIAIS DE FM - A FONTE INTERFERIDORA**

#### **3.1 ESTAÇÕES COMERCIAIS DE FM.**

As estações comerciais de FM são consideradas, neste trabalho, como um sistema de comunicação que pode interferir no sistema de comunicação móvel. Por este motivo será feita uma descrição das características mais importantes das estações de rádio difusão FM. Por fim, será analisado o comportamento dos sinais gerados por estas estações referente à largura de faixa ocupada e ao espectro de potência, pois estes fatores representam os aspectos mais relevantes na caracterização do sinal interferente.

Estações comerciais de FM referem-se às transmissões de rádio difusão de voz e música (áudio frequência), que são recebidas pelo público em geral numa faixa de frequência de 88,1 a 107,9 MHz. FM oferece recepção com mais fidelidade do que os sistemas de rádio difusão AM.

As frequências usadas pelas estações de FM, segundo LINDSEY (1993), limitam, tipicamente, a cobertura do sistema em condições de linha de visada do sinal. A área de cobertura de uma estação FM depende da ERP (Potência Efetivamente Radiada) da estação, da altura da antena transmissora em relação ao nível médio do terreno e do diagrama de radiação da antena transmissora. O aumento da área de cobertura pode ser conseguido aumentando tanto a ERP quanto a altura da antena.

#### **3.2 ALOCAÇÕES DE FREQUÊNCIA**

A faixa destinada aos sistemas de rádio difusão FM compreende a banda de 88,1 a 107,9 MHz. Os canais FM são igualmente espaçados em 200 kHz. Logo, é possível obter 100 frequências portadoras. A largura de faixa de cada canal equivale a 200 kHz, não tendo assim nenhuma faixa de guarda entre canais adjacentes.

O máximo desvio da frequência da portadora sob condições normais é  $\pm 75$  kHz, entretanto, em certas condições especiais, desde que autorizado pelo órgão competente, este valor pode ser ultrapassado, mas em nenhuma circunstância pode exceder a  $\pm 82,5$  kHz.

### **3.3 CLASSIFICAÇÃO DAS ESTAÇÕES**

Em rádio difusão FM, as estações são classificadas de acordo com a máxima ERP permitida e a altura da antena acima do nível médio do terreno em suas áreas de serviço.

As estações classe A oferecem serviço primário em um raio em torno de 28 km com 6000 W de ERP e uma altura máxima de 100 m. A classe C, classe de potência mais alta, opera com ERP máxima de 100.000 W e altura da antena de até 600 m, proporcionando uma cobertura em torno de 92 km.

As potências e as alturas acima do nível médio do terreno (HAAT - Height Above Average Terrain) para todas as classes estão mostrados na Tabela 3.1

Todas as classes podem operar com a altura das antenas acima do especificado, desde que acompanhado de uma redução apropriada da ERP. Já a potência especificada não pode ser excedida, mesmo que seja reduzida a altura da antena.

A classificação das estações também determina a distância permitida entre as estações que utilizam mesmos canais e canais adjacentes.

**TABELA 3.1** Classificação das estações FM, potências e alturas de torre

<b>Classe da Estação</b>	<b>ERP Máxima</b>	<b>HAAT, m (ft)</b>	<b>Distância, km</b>
A	6 kW (7,8 dBk)	100 (328)	28
B1	25 kW (14,0 dBk)	100 (328)	39
B	50 kW (17,0 dBk)	150 (492)	52
C3	25 kW (14,0 dBk)	100 (328)	39
C2	50 kW (17,0 dBk)	150 (492)	52
C1	100 kW (20,0 dBk)	299 (981)	72
C	100 kW (20,0 dBk)	600 (1968)	92

*Fonte:* FCC Rules and Regulations, Revised 1991; vol. III, Part 73.211(b)(1).

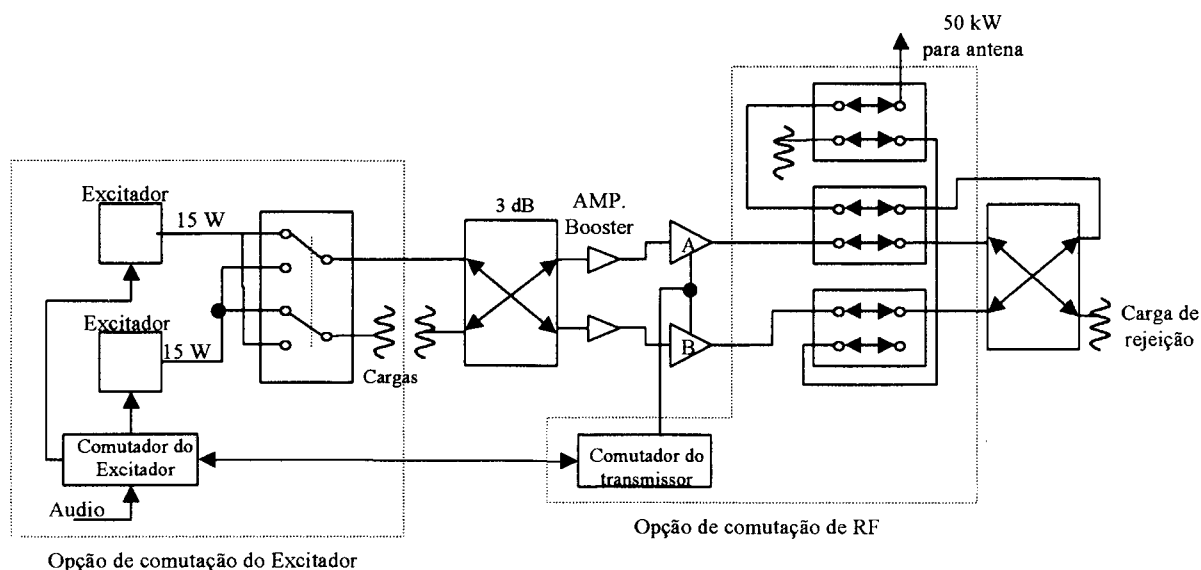
### 3.4 TRANSMISSORES

Os transmissores das estações de rádio difusão FM têm uma potência de saída tipicamente entre 10 kW e 50 kW. A Figura 3.1 mostra um diagrama em blocos típico de um transmissor FM.

Os sistemas transmissores são formados por dois transmissores que operam em paralelo de forma a aumentar a confiabilidade com relação a falhas, sendo duplicados tanto os circuitos excitadores quanto o amplificador de potência.

Os circuitos amplificadores de alta potência são construídos, geralmente, a válvula. Segundo LINDSEY (1993), os transmissores em estado sólido de mais alta potência são atualmente de 10 kW.





**FIGURA 3.1** Diagrama de blocos de um transmissor de FM típico. (Fonte: Harris Corporation, Quincy, Ill.)

### 3.5 CARACTERÍSTICA DOS SINAIS MODULADOS EM FM.

No processo de modulação analógica, um ou mais parâmetros de uma portadora (amplitude ou ângulo) são variados em conformidade com um outro sinal que representa a mensagem (sinal modulante). Quando o parâmetro escolhido for a amplitude da portadora, tem-se uma modulação em amplitude. Quando o parâmetro for o ângulo, tem-se uma modulação angular. Dois métodos são comumente usados em modulação angular: *modulação em fase* (PM) e *modulação em frequência* (FM). Seja um sinal modulado representado por um sinal senoidal genérico:

$$\varphi(t) = A \cos \theta(t) \quad (3.1)$$

Aqui,  $\theta$  é o ângulo do sinal senoidal e é uma função de  $t$ . Para um sinal senoidal de frequência fixa:

$$\theta(t) = \omega_c t + \theta_0 \quad (3.2)$$

e

$$\omega_c = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.3)$$

Para se obter modulação em fase, basta fazer  $\theta(t)$  variar linearmente com o sinal modulante, assim  $\theta(t) = \omega_c t + \theta_0 + k_f f(t)$ , onde  $k_f$  é uma constante e  $f(t)$  representa o sinal modulante.

Na modulação em frequência, a frequência instantânea, definida como

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (3.4)$$

varia de maneira linear com o sinal de informação, isto é

$$\omega_i(t) = \omega_c + k_f f(t) \quad (3.5)$$

A expressão matemática do sinal senoidal modulado em FM pode ser obtido facilmente. Das equações (3.4) e (3.5) podemos concluir que

$$\theta(t) = \int \omega_i(t) dt = \omega_c t + k_f \int f(t) dt + \theta_0 \quad (3.6)$$

Então

$$\varphi_{FM}(t) = A \cos[\omega_c t + \theta_0 + k_f \int f(t) dt] \quad (3.7)$$

representa a portadora modulada em frequência. É conveniente expressar sinais senoidais na forma exponencial. Assim :

$$\varphi(t) = A \cos \theta(t) = \text{Re}[A e^{j\theta(t)}] \quad (3.8)$$

Vamos usar a notação  $\hat{\varphi}(t)$  para representar a forma exponencial de  $\varphi(t)$ . Logo se

$$\hat{\varphi}(t) = A e^{j\theta(t)} \quad (3.9)$$

então

$$\varphi(t) = \text{Re}[\hat{\varphi}(t)] \quad (3.10)$$

De acordo com esta notação, a portadora FM pode ser expressa como

$$\hat{\varphi}(t) = A e^{j[\omega_c t + k_f \int f(t) dt]} \quad (3.11)$$

Por conveniência façamos

$$\int f(t) dt = g(t)$$

Assim

$$\hat{\varphi}(t) = A e^{j[\omega_c t + k_f g(t)]} \quad (3.12)$$

Há duas denominações para sinais modulados em FM em função da largura de faixa ocupada pelo sinal. A constante  $k_f$  é determinada de forma a controlar o desvio da frequência da portadora. Para pequenos valores de  $k_f$  o desvio da portadora é pequeno, conseqüentemente espera-se que o sinal FM tenha uma banda estreita. Se  $k_f$  for grande, a largura de faixa deve ser proporcionalmente grande. De fato, isto é verdade. Logo, quando a condição  $k_f g(t) \ll 1$  for satisfeita tem-se um sinal *FM de banda estreita*, caso contrário tem-se um sinal *FM de banda larga*.

Os sinais gerados pelas estações comerciais de FM são considerados sinais FM de banda larga. Por isso, será dada atenção apenas à determinação da largura de faixa no caso de FM de banda larga.

Segundo LATHI (1968) não é possível determinar uma expressão precisa para a largura de faixa de uma portadora FM sendo modulada por um sinal  $f(t)$  genérico dado que a modulação é não linear. Então, escolhendo um sinal modulante  $f(t)$  específico do tipo

$$f(t) = a \cos \omega_m t \quad (3.13)$$

a frequência instantânea é obtida aplicando a equação (3.13) em (3.5)

$$\omega_i(t) = \omega_c + ak_f \cos \omega_m t \quad (3.14)$$

Definindo uma nova constante  $\Delta\omega = ak_f$ , denominada de *desvio de pico da frequência da portadora*, reescreve-se a equação (3.14) como

$$\omega_i(t) = \omega_c + \Delta\omega \cos \omega_m t \quad (3.15)$$

Substituindo (3.15) em (3.6), o ângulo do sinal FM com um sinal modulante senoidal é

$$\theta(t) = \omega_c t + \beta \sin \omega_m t + \theta_0 \quad (3.16)$$

onde

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_m} \quad (3.17)$$

é chamado de *índice de modulação*. Combinando as equações (3.10) e (3.16), obtém-se

$$\varphi(t) = \operatorname{Re}\{Ae^{j\omega_c t} e^{j\beta \sin \omega_m t}\} \quad (3.18)$$

A constante de fase  $\theta_0$  foi absorvida em  $A$  por conveniência. A segunda exponencial é obviamente uma função periódica, de período  $2\pi/\omega_m$ , e pode ser expandida por uma série de Fourier. Assim, pode-se obter um resultado em termos de conteúdo espectral. Fazendo isso o resultado é

$$\varphi(t) = \text{Re} \left\{ A e^{j\omega_c t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) e^{jn\omega_m t} \right\} \quad (3.19)$$

onde  $J_n(\beta)$  é a função de *Bessel* da primeira espécie, de ordem  $n$  e argumento  $\beta$ . De acordo com a equação (3.19), nota-se que o sinal FM contém  $2n$  frequências laterais centradas em  $\omega_c$ , ou seja, a largura de faixa é  $2n\omega_m$ . Como  $n$  varia de  $-\infty$  a  $+\infty$  a largura de faixa requerida é infinita.

Entretanto, na prática, é possível desprezar os componentes de mais alta ordem, pois quase toda a energia está confinada dentro de uma banda limitada. Assim é possível especificar uma largura de faixa onde a distorção é considerada dentro de limites toleráveis.

Baseado em propriedades das funções de *Bessel*, uma relação aproximada para a largura de faixa (BW) de  $\varphi(t)$ , conhecida como *regra de Carson*, é apresentada como

$$BW \approx 2(\Delta\omega + \omega_m) = 2\omega_m(1 + \beta) \quad (3.20)$$

Segundo YACOUB (1993), esta regra, na prática, é aplicada mesmo para modulação de sinais não senoidais, em que  $\omega_m$  é considerada a maior frequência do sinal modulante.

STREMLER (1996) acrescenta que valores numéricos obtidos das tabelas das funções de *Bessel* ou solução computacional podem ser usados para um resultado mais precisos da determinação da largura de faixa. Apresenta ainda, uma outra aproximação consistindo no uso de algoritmo da transformada rápida de Fourier para computação direta dos componentes espectrais.

O conteúdo de potência do sinal FM modulado por sinais periódicos é expresso como uma soma discreta dos componentes senoidais. Assim a potência de  $\varphi(t)$  é igual à soma das potências dos componentes individuais. Então

$$\overline{\varphi^2(t)} = \frac{A^2}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\beta). \quad (3.21)$$

Pode ser mostrado que o somatório é 1 para qualquer valor de  $\beta$ . Então,

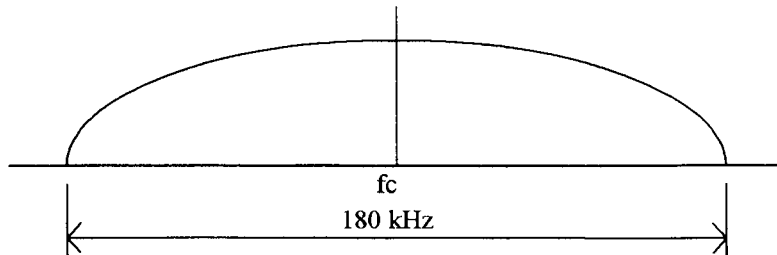
$$\overline{\varphi^2(t)} = \frac{A^2}{2} \quad (3.22)$$

Após a análise feita, podemos caracterizar o sinal FM gerado pelas estações comerciais referente a largura de faixa, de acordo com a regra de Carson. Portanto, para um desvio  $\Delta f$  igual a  $\pm 75$  kHz e frequência máxima do sinal modulante igual a 15 kHz, temos

$$BW(\text{kHz}) \approx 2(\Delta f + f_m) = 2(75 + 15) = 180\text{kHz} \quad (3.23)$$

A Figura 3.2 mostra a largura de faixa ocupada por uma portadora modulada em FM conforme as normas de rádio difusão comercial. Na Figura, a faixa é mostrada como uma ocupação contínua do espectro.

Na verdade, as frequências laterais geradas pelo processo de modulação são discretas, mas devido ao fato que FM é uma modulação não linear e o sinal modulante (voz e música) é formado por um conjunto de sinais periódicos, aparecerão termos de modulação cruzada. Portanto, é feita uma aproximação para uma ocupação contínua do espectro.



**FIGURA 3.2** Largura de faixa ocupada por uma portadora de rádio difusão FM Comercial.

### 3.6 A ESTAÇÃO DE FM COMO FONTE INTERFERIDORA

Os transmissores das estações FM são compostos por amplificadores de alta potência nos estágios de saída. Estes, por sua vez, são construídos com dispositivos de estado sólido ou válvulas. Devido à não linearidade destes dispositivos na região de operação, aparecerão na saída do estágio de amplificação sinais harmônicos e produtos de intermodulação do sinal aplicado à entrada.

Apesar de possuir filtros na saída do estágio de amplificação para atenuar estes sinais espúrios, os harmônicos não são completamente desvanecidos. Tendo em vista a ordem de grandeza das potências envolvidas, mesmo que os sinais harmônicos sejam bastante atenuados em relação à potência da portadora, o valor absoluto pode ser considerado grande o suficiente para interferir nos sistemas móveis.

A *Norma Técnica para Emissoras de Radiodifusão em Frequência Modulada* n° 07/80, aprovada pela portaria n° 017, de 31/01/83, D.O.U. 02/02/83 no item 3.2.7 rege que:

“...As emissões em frequências afastadas de mais de 600 kHz da frequência da portadora deverão estar  $(73+P)$  dB ( $P$  = Potência de operação do transmissor em dBk) abaixo do nível da portadora sem modulação, sendo 80 dB a maior atenuação exigida.”

Portanto, se os sinais espúrios provenientes de harmônicos dos sinais FM estiverem 80 dB abaixo da portadora sem modulação as estações comerciais estarão protegidas pela legislação Brasileira. Ora, 80 dB abaixo de um transmissor de 100 kW equivale a 0 dBm, o que é muito em sistemas celulares. Só para se ter uma idéia, a sensibilidade de um aparelho celular é da ordem de -120 dBm.

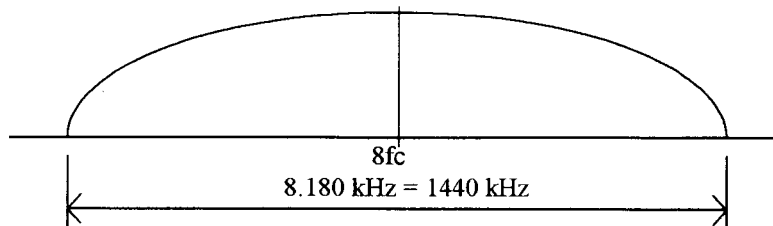
A ordem de grandeza das potências dos sinais espúrios combinada com a proximidade da estação base do sistema móvel celular com a estação transmissora FM são a causa da interferência provocada pelos sistemas de rádio difusão.

A largura de faixa do sinal interferente depende diretamente da ordem dos harmônicos gerados, ou seja

$$BW_{\text{int}} = nBW_{\text{FM}} \quad (3.25)$$

onde  $n$  é a ordem da harmônica em relação à frequência fundamental.

A Figura 3.3 mostra o espectro do envelope da 8ª harmônica do sinal FM. Com uma largura de faixa de 1,44 MHz, centrada na frequência oito vezes superior a frequência da portadora  $f_c$ , este sinal seria capaz de interferir em 48 canais AMPS.



**FIGURA 3.3** Largura de faixa ocupada por uma portadora de rádio

Há a possibilidade de o sinal interferente, provindo da estação de FM, ser de 8ª e 9ª harmônicas da portadora fundamental. Para o caso de interferência pela 9ª harmônica, a largura de faixa do sinal interferente vale 1,62 MHz ou 54 canais AMPS, podendo ser equivalente a todos os canais de uma estação rádio base.

A Tabela 3.2 relaciona todas as faixas de operação das estações de FM que podem gerar sinais interferentes para o sistema celular, tanto para a banda A quanto para a banda B.

TABELA 3.2 Estações de FM potencias para interferência em sistemas celulares AMPS.

Estações de FM	Faixa Interferente		Faixa Interferida									
			Banda A					Banda B				
	8ª Harmônica	9ª Harmônica	Voz		Controle		Num. Canais	Voz		Controle		Num. Canais
91,5	731,28 - 732,72	822,69 - 824,31	824,025 - 824,310				10					0
91,7	732,88 - 734,32	824,49 - 826,11	824,490 - 826,110				54					0
91,9	734,48 - 735,92	826,29 - 827,91	826,290 - 827,910				54					0
92,1	736,08 - 737,52	828,09 - 829,71	828,090 - 829,710				54					0
92,3	737,68 - 739,12	829,89 - 831,51	829,890 - 831,510				54					0
92,5	739,28 - 740,72	831,69 - 833,31	831,690 - 833,310				54					0
92,7	740,88 - 742,32	833,49 - 835,11	833,490 - 834,375		834,375 - 835,005	50			835,005 - 835,110			4
92,9	742,48 - 743,92	835,29 - 836,91				0	835,635 - 836,910	835,290 - 835,635				54
93,1	744,08 - 745,52	837,09 - 838,71				0	837,090 - 838,710					54
93,3	745,68 - 747,12	838,89 - 840,51				0	838,890 - 840,510					54
93,5	747,28 - 748,72	840,69 - 842,31				0	840,690 - 842,310					54
93,7	748,88 - 750,32	842,49 - 844,11				0	842,490 - 844,110					54
93,9	750,48 - 751,92	844,29 - 845,91	844,995 - 845,910			31	844,290 - 844,995					23
94,1	752,08 - 753,52	846,09 - 847,71	846,090 - 846,495			13	846,495 - 847,710					41
94,3	753,68 - 755,12	847,89 - 849,51				0	847,890 - 848,985					36
103,1	824,08 - 825,52	927,09 - 928,71	824,080 - 825,520			48						0
103,3	825,68 - 827,12	928,89 - 930,51	825,680 - 827,120			48						0
103,5	827,28 - 828,72	930,69 - 932,31	827,280 - 828,720			48						0
103,7	828,88 - 830,32	932,49 - 934,11	828,880 - 830,320			48						0
103,9	830,48 - 831,92	934,29 - 935,91	830,480 - 831,920			48						0
104,1	832,08 - 833,52	936,09 - 937,71	832,080 - 833,520			48						0
104,3	833,68 - 835,12	937,89 - 939,51	833,680 - 834,375		834,375 - 835,005	44			835,005 - 835,120			4
104,5	835,28 - 836,72	939,69 - 941,31				0	835,635 - 836,720	835,280 - 835,635				48
104,7	836,88 - 838,32	941,49 - 943,11				0	836,880 - 838,320					48
104,9	838,48 - 839,92	943,29 - 944,91				0	838,480 - 839,920					48
105,1	840,08 - 841,52	945,09 - 946,71				0	840,080 - 841,520					48
105,3	841,68 - 843,12	946,89 - 948,51				0	841,680 - 843,120					48
105,5	843,28 - 844,72	948,69 - 950,31				0	843,280 - 844,720					48
105,7	844,88 - 846,32	950,49 - 952,11	844,995 - 846,320			44	844,880 - 844,995					4
105,9	846,48 - 847,92	952,29 - 953,91	846,480 - 846,495			0	846,495 - 847,920					48
106,1	848,08 - 849,52	954,09 - 955,71				0	848,080 - 848,985					30



### **3.7 CONCLUSÕES**

Neste capítulo foram apresentadas as estações comerciais de FM como fonte interferidora dos sistemas celulares. Para isso, foram apresentadas as principais características das estações FM e suas classificações. Além disso, foi feita uma abordagem dos sinais modulados em FM, com o objetivo de determinar a largura de faixa dos sinais gerados pelas estações, de modo a identificar a forma do sinal interferente. Por fim, foram apresentadas as possíveis estações FM que, através dos harmônicos da portadora fundamental, podem provocar interferências na faixa de frequência dos sistemas celulares.

## CAPÍTULO 4

### 4 RUÍDO E INTERFERÊNCIA EM SISTEMAS CELULARES

#### 4.1 RUÍDO E INTERFERÊNCIA

De acordo com WATT apud YACOUN (1993, p.253), “ruído e interferência são dois fenômenos que limitam o campo de operação de todos equipamentos de rádio”.

Segundo LATHI (1968, p.264), “...ruído é um sinal indesejado no qual não tem relação com o sinal desejado”. E, conforme YACOUN (1993), interferência é caracterizada por ser originada pelos próprios sistemas de comunicações.

O conhecimento destes fenômenos é fundamental na elaboração de um sistema de comunicação, pois eles são os fatores limitantes do sistema. Assim, o desempenho é determinado a partir de quão acima o sinal desejado está em relação à potência de ruído na mesma banda e no mesmo instante, ou seja, a razão SNR (signal-to-noise ratio).

Existem várias fontes e tipos de ruído. LATHI (1968, p.264) classifica o ruído de uma maneira geral, com relação ao seu comportamento, como sinais de ruído aleatórios e não aleatórios. Já YACOUN (1993) classifica ruído, com relação à modificação introduzida no sinal, como sendo do tipo aditivo e multiplicativo.

Conforme LATHI (1968), as fontes de ruído mais importantes são ruídos causados pelo homem, ruídos provindos da atmosfera, da galáxia, ruídos do receptor e sinais indesejáveis provindo de outras fontes, como outros sistemas de comunicações.

Para YACOUN (1993) os principais tipos de ruído que influenciam as comunicações móveis são: 1) Dentre os considerados ruídos aditivos: o ruído do receptor, ruído atmosférico, ruído galáctico e aqueles causados por atividades humanas, como o uso de motores elétricos, luzes de neon, linhas de força. 2) Dentre os considerados multiplicativos: o ruído provocado por desvanecimento.

ARREDONDO (1979) acrescenta um outro ruído, conhecido como *ruído click*, resultado da situação onde o receptor de FM captura o ruído, ao invés de capturar o sinal desejado, sendo que estas situações ocorrem durante o desvanecimento do sinal. Durante estes intervalos de desvanecimento, a fase da onda composta no circuito de FI (Frequência Intermediária) pode mudar em  $2\pi$  radianos num período de tempo proporcional a largura da faixa do filtro de FI. Esta mudança de fase faz com que o discriminador apresente um impulso no processador de banda base, resultando em um ruído *click* com espectro de potência plano na faixa de voz, após o discriminador de FM. O autor acrescenta que o ruído *click* representa a principal componente de ruído na banda básica. Além de chegar em rajadas, o ruído *click* tem correlação temporal com os desvanecimentos do sinal de RF.

Outro fator que provoca uma componente de erro adicional na resposta do discriminador, segundo ARREDONDO (1979), é o *FM aleatório*. O mesmo fenômeno de multipercurso que provoca o desvanecimento conhecido como *Rayleigh fading* é responsável pelo FM aleatório. Segundo YACOUN (1993), a natureza aleatória da fase variante no tempo dos sinais sob efeito de desvanecimento provoca o FM aleatório que possui uma potência proporcional ao quadrado da velocidade do movimento do usuário.

ARREDONDO (1979) conclui dizendo que o FM aleatório representa essencialmente o limite inferior de ruído na banda base de voz, quando outras fontes de ruído e interferência são removidas. E para comunicações de dados este fator não é significativo.

As interferências, que segundo YACOUN (1993) são geradas pelo próprio sistema, são interferências de canal adjacente e cocanal.

A interferência de canal adjacente ocorre quando uma conversação é interferida por uma outra que está sendo efetuada por um canal adjacente, seja na mesma célula ou em uma célula próxima o suficiente. Mesmo que as conversações sejam feitas em bandas de frequências separadas, este tipo de interferência ocorre devido às limitações do equipamento, instabilidade de frequência, largura de faixa do receptor e filtragem.

A interferência cocanal é inerente à própria concepção da arquitetura celular que utiliza a técnica de reuso de frequência. Ocorre quando uma conversação sofre interferência de uma outra que utiliza a mesma banda de frequência.

As interferências cocanal e adjacente descritas anteriormente podem ocorrer em duas situações distintas. Isto é, podem ser sentidas pela estação base, proveniente do enlace estação móvel para estação base, onde a estação base recebe o sinal vindo do usuário que ela está servindo e também sinais de usuários de outras células, que utilizam canais na mesma frequência e frequência adjacente.

A outra situação ocorre no enlace estação base para estação móvel, onde a estação móvel recebe o sinal provindo da célula que está servindo-a, e também, de outras células que utilizam canais na mesma frequência ou adjacentes.

A situação que provoca interferência mais significativa depende de alguns fatores, como distribuição de usuários dentro da área de cobertura da célula, balanceamento de potência dos dois enlaces, setorização do sistema radiante da célula e o perfil de tráfego na célula em questão e nas células vizinhas.

Em ambientes de rádio móvel, onde existem os fenômenos de desvanecimento *Rayleigh* associado à interferência cocanal, ocorrerá durante o desvanecimento do envelope do sinal, a captura do sinal interferente no receptor. O resultado, segundo ARREDONDO (1979), é uma rajada de modulação de voz interferente e não inteligível, devido ao curto período do desvanecimento. Nas transmissões de voz, a amplitude relativa da interferência na banda base durante a rajada depende das amplitudes relativas dos desvios de frequência instantâneos do sinal de voz desejado e do sinal interferente.

Além disso, como a portadora do sinal desejado e a portadora do sinal interferente possuem uma ligeira diferença em frequência devido à tolerância dos osciladores, resultará em uma diferença de frequência que pode cair dentro da faixa de voz. Para ARREDONDO (1979), esta diferença é, às vezes, audível como um *wobbling tone*, ou seja, como um tom fraco e instável. O autor acrescenta que mesmo com razões C/I (Carrier-to-Interference ratios) em torno de 30 dB e em ambientes com desvanecimento este tom pode ser audível.

Contudo, a associação de interferência cocanal e diferença de frequências das portadoras gera um componente adicional da linha de *click* que afeta tanto as transmissões de voz quanto as transmissões de dados.

LEE (1990) acrescenta que uma outra forma de interferência sentida nos sistemas celulares é o produto de intermodulação gerado pela não-linearidade dos amplificadores de recepção das estações base, em que o sinal de um usuário em conversação, próximo à estação base, poderá saturar o amplificador de FI (frequência intermediária).

Se o produto de intermodulação cair dentro de um outro canal em conversação da estação base, cujo usuário estiver longe da estação, ou seja, próximo ao limite da célula, em que o nível de recepção é fraco, ocorrerá, então, uma interferência por intermodulação.

Os ruídos aditivos descritos (ruídos de receptor, atmosférico, provindo da galáxia, ruídos causados por atividades humanas e ruídos provindos de outros sistemas de comunicação) afetam os sistemas celulares independente do padrão da interface ar empregado, assim como os ruídos multiplicativos. Ou seja, independente da técnica de modulação, estes fenômenos de ruído implicarão em limitações da comunicação.

Já os ruídos descritos como o ruído click, o FM aleatório e o ruído proveniente da diferença das frequências das portadoras, referem-se, em especial, aos sistemas celulares que empregam modulação FM na interface ar e a técnica de detecção não coerente na recepção. Pois, são fenômenos inerentes da modulação FM num ambiente móvel caracterizado por desvanecimento *Rayleigh* associado às interferências co-canal e adjacente. Logo, estes ruídos se aplicam ao padrão AMPS sob estudo neste trabalho.

Neste trabalho estamos interessados em analisar a interferência sentida pela estação base provocada por estações comerciais de FM, que representa um ruído aditivo provindo de outro sistema de comunicação que cai dentro da faixa de frequência de trabalho do sistema celular AMPS. Dependendo da intensidade destes sinais, este fenômeno passa a se constituir na mais significativa degradação e limitação do sistema entre todos os tipos de ruído e interferência mencionados acima.

## 4.2 CONSEQUÊNCIAS DE INTERFERÊNCIA PARA O TRÁFEGO DE VOZ

Os sistemas celulares detectam interferência ou a presença de sinais não identificados em canais que não estejam sendo usados para conversação, ou seja, que estão em estado livre. Quando ocorre a detecção de interferência em algum rádio da estação base, a Central de Comutação e Controle ordena que este rádio fique em estado de bloqueio. Em outras palavras, não poderá ser usado para escoar nenhuma conversação até que a interferência cesse. Logo, observa-se que, se alguma estação base estiver sob interferência constante, como é a característica de interferência provocada por estações comerciais de FM, os canais afetados ficarão indisponíveis para processarem chamadas. Conseqüentemente, a capacidade de escoamento de tráfego da estação reduzirá.

Se a interferência provocada pela estação comercial de FM estiver abaixo do limite perceptível pela estação base, ocorrerá que os canais utilizados para conversação estarão susceptíveis aos ruídos de banda base descritos na seção anterior. O efeito da interferência das estações de FM, neste caso, será sentido como uma perda de qualidade do sinal de voz e, em alguns casos, podendo ser notado pelo usuário, principalmente em situações em que o usuário estiver na borda da célula, sob forte obstrução do caminho de RF, ou nos períodos que o sinal estiver sofrendo desvanecimento. Estas condições resultam em um nível muito baixo do sinal desejado no receptor.

Neste trabalho será analisado somente o caso particular de interferência em canal de voz, em que o ruído sentido pelo rádio da estação base na sua faixa de frequência é sempre superior a um limiar mínimo suportável pelo sistema, no qual a decisão de indisponibilizar o canal de voz para conversação é tomada pela central de comutação e controle.

Além disso, outros casos de interferência, como cocanal e canal adjacente, causadas pelo próprio sistema, apresentam características diferentes, pois dependem da distribuição dos usuários dentro da célula, do tráfego das células vizinhas, do controle de potência das estações móveis e parâmetros de hand-off, fazendo com que a indisponibilidade dos canais de voz seja um evento estatístico que depende dos fatores mencionados acima.

#### 4.2.1 GRAU DE SERVIÇO E PERDA DE TRÁFEGO DO SISTEMA CELULAR SOB INTERFERÊNCIA

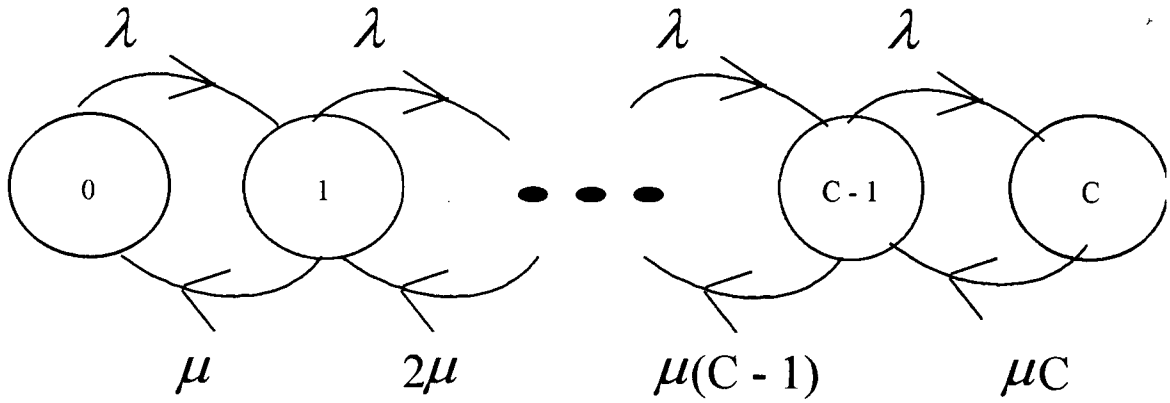
Para analisar o impacto na capacidade de escoamento de tráfego de uma célula devido à indisponibilidade de um determinado número de canais de voz, faz-se necessária uma análise do comportamento de tráfego em sistemas celulares.

As características de tráfego de sistemas celulares diferem um pouco do sistema telefônico fixo, mas apesar disso, o planejamento e projeto de sistemas celulares ainda são realizados com as ferramentas de tráfego convencional. YACOUB (1993) aponta os motivos destas diferenças como sendo a mobilidade dos usuários, hand-off e roaming. Como estes eventos estão sempre ocorrendo, isto ocasiona uma redução no tempo médio de ocupação do canal em que a chamada foi efetuada e aumenta o tráfego para onde os usuários estão se movendo. O autor ainda acrescenta que uma investigação do desempenho de tráfego de um sistema móvel requer que se levem em conta todos estes fenômenos, conduzindo a um modelo de tráfego muito complexo. Mas apesar da recomendação do autor, ele mesmo admite a dificuldade de encontrar ferramentas e modelos que atendam a estes requisitos e acrescenta que os modelos convencionais são largamente aceitos para análise de tráfego em sistemas de rádio móvel.

Devido à complexidade de tratar com os aspectos particulares, abordados anteriormente, será utilizado o modelo de tráfego mais amplamente aceito - A teoria de filas Markovianas, onde:

- a) As chamadas têm uma taxa de chegada Poissoniana;
- b) O tempo de ocupação do canal tem distribuição exponencial negativa;
- c) Chamadas bloqueadas são perdidas.

Seja o seguinte modelo de tráfego referente a uma fila M/M/C/C, ou seja, um processo Markoviano onde as chegadas são Poissonianas e a duração dos serviços é exponencial negativa, com C canais e sem buffer.



**FIGURA 4.1** Fila de Markov, processo M/M/C/C

A Figura 4.1 apresenta um diagrama de transição de estados, em que os estados representam o número de canais ocupados. As transições são permitidas somente entre estados vizinhos.  $\lambda$  é a taxa média de chegada de chamadas (chamadas por segundo), onde a probabilidade de  $k$  chegadas em um intervalo  $t$  é caracterizada por uma distribuição de probabilidade de Poisson mostrada abaixo:

$$p_k = \frac{(\lambda t)^k}{k!} \exp(-\lambda t) \quad (4.1)$$

Para  $1/\mu$  representando o tempo médio de ocupação do canal; a probabilidade de ocupação do canal ser menor ou igual a um período  $t$ , representada por uma distribuição de probabilidade exponencial negativa, é

$$H(t) = 1 - \exp(-\mu t) \quad (4.2)$$

O modelo apresentado é um processo de nascimento e morte que constitui um caso especial do processo de Markov, onde transições só podem ocorrer de um estado para o estado vizinho superior ou inferior. Uma mudança de estado  $S_k$  para um estado acima, ou seja,  $S_{k+1}$  implica em um nascimento dentro da população, ocorrendo com uma taxa  $\lambda$ , uma transição de  $S_k$  para  $S_{k-1}$  implica em uma morte com uma taxa  $k\mu$ .

Da Figura 4.1, podemos obter as seguintes relações :

$$\lambda p_0 = \mu p_1 \therefore p_1 = \frac{\lambda}{\mu} p_0, \quad (4.3)$$

onde  $p_k$  representa a probabilidade de  $k$  canais estarem ocupados. Fazendo



$$A = \frac{\lambda}{\mu} \quad (4.4)$$

e substituindo (4.4) em (4.3)

$$p_1 = A \cdot p_0 \quad (4.5)$$

$$\lambda p_1 = 2\mu p_2 \therefore p_2 = \frac{\lambda}{2\mu} p_1 \therefore p_2 = \frac{A}{2} p_1 \quad (4.6)$$

Resolvendo para  $p_0$

$$p_k = \frac{A^k}{k!} p_0 \quad (4.7)$$

Sabendo-se que a soma de todos os resultados possíveis resulta em 1. Então

$$p_0 \sum_{i=0}^C \frac{A^i}{i!} = 1 \therefore p_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^C \frac{A^i}{i!}} \quad (4.8)$$

Logo, a probabilidade de  $k$  canais estarem ocupados, substituindo (4.8) em (4.7), é

$$p_k = \frac{A^k / k!}{\sum_{i=0}^C \frac{A^i}{i!}} \quad (4.9)$$

O bloqueio de chamada irá ocorrer quando todos os canais estiverem ocupados. Então a probabilidade de bloqueio é igual à probabilidade de todos os canais estarem ocupados, ou seja

$$p_b = p_C = \frac{A^C / C!}{\sum_{i=0}^C \frac{A^i}{i!}} \quad (4.10)$$

A equação (4.10) é conhecida como a fórmula de **Erlang-B**. O valor médio da probabilidade de bloqueio de um sistema durante a HMM (Hora de Maior Movimento) é denominado **Grau de Serviço**. Por isso o grau de serviço é um parâmetro de qualidade do sistema facilmente associado à capacidade de tráfego. Como o sistema celular oferece vários pontos de acessos aos usuários (via as Estações base) o parâmetro grau de serviço pode ser melhor associado a uma célula específica.

A fila M/M/C/C é sem espera, e portanto o tempo médio de permanência na fila  $E\{T\}$  é igual ao tempo médio de ocupação do canal.

$$E\{T\} = \frac{1}{\mu} \quad (4.11)$$

A taxa média de ingresso  $E\{\lambda_c\}$  é igual a taxa média de chamadas menos a taxa média de chamadas bloqueadas

$$E\{\lambda_c\} = \lambda(1 - p_b) \quad (4.12)$$

Assim, invocando o teorema de Little, PAPOULIS (1991), tem-se:

$$E\{C\} = E\{\lambda_c\}E\{T\} = \lambda(1 - p_b) \frac{1}{\mu} \quad (4.13)$$

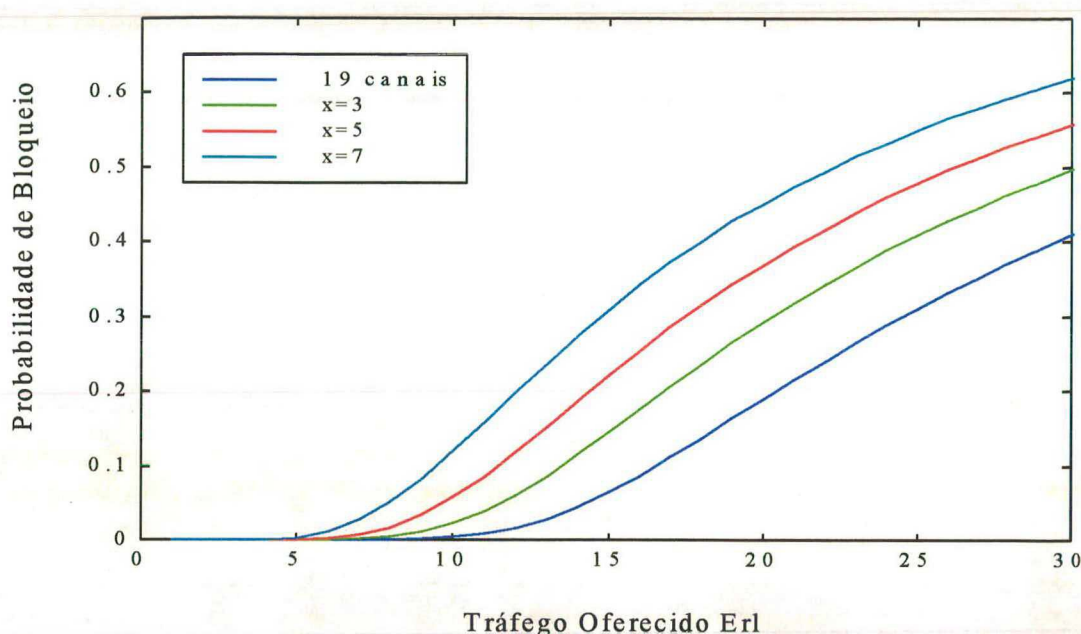
$$E\{C\} = A(1 - p_b) = A[1 - \text{Er}(A, C)] \quad (4.14)$$

onde  $E\{C\}$  é o número médio de circuitos ocupados, denominado **Tráfego escoado** e **A** é denominado de **Tráfego oferecido**.

Com a ocorrência de interferência em canais de voz, e sabendo-se que os canais sob interferência ficam indisponíveis para escoar tráfego, é óbvio notar que o bloqueio aumentará e, conseqüentemente, o tráfego escoado diminuirá.

Para determinar o aumento da probabilidade de bloqueio com a perda de alguns canais de voz por indisponibilidade, basta aplicar a equação (4.10) e fazer o número de canais igual ao número de canais disponíveis para cursar o tráfego de voz.

A Figura 4.2 mostra a probabilidade de bloqueio para uma célula com 19 canais e algumas situações de canais bloqueados (x), ou indisponíveis, em função do tráfego oferecido.



**FIGURA 4.2** Probabilidade de bloqueio de uma célula com 19 canais em função do tráfego oferecido para as situações: sem perda de canais; perda de 3 canais; perda de 5 canais e perda de 7 canais.

Para determinar o tráfego escoado em função do tráfego oferecido para várias situações de perda de canais, basta aplicar a equação (4.14) com a correção do número de canais sem interferência apresentada a seguir.

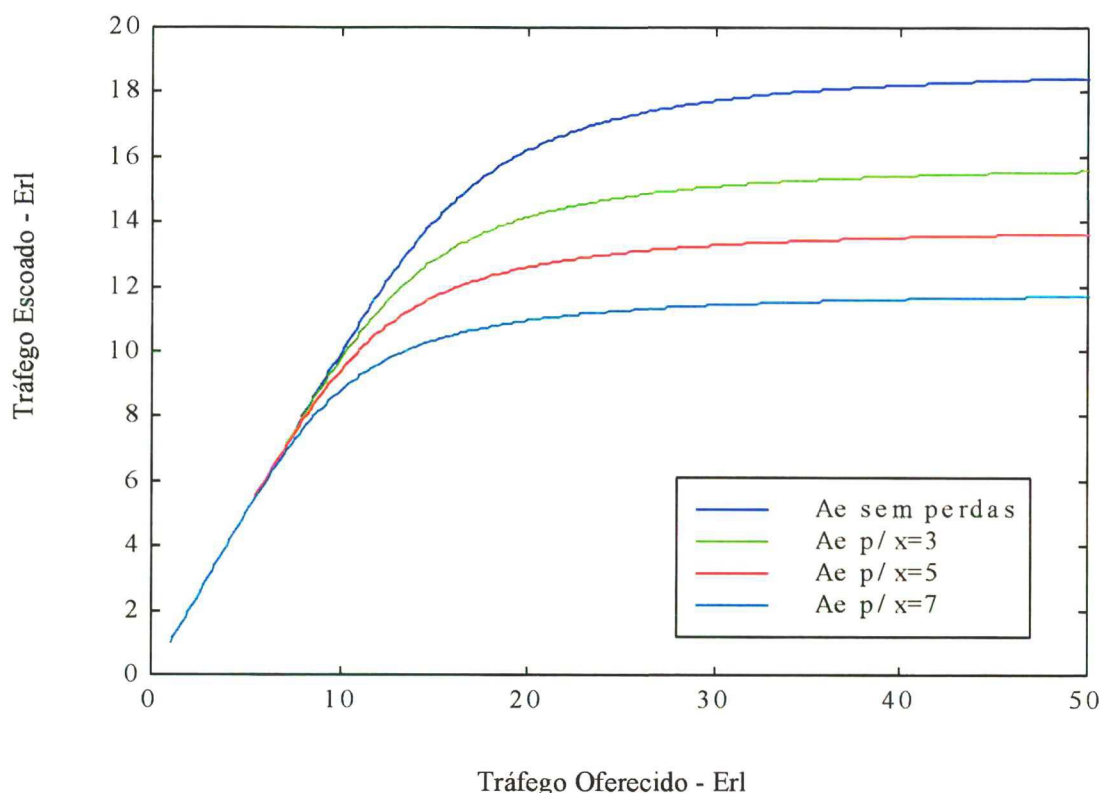
$$A_e = A[1 - \text{Er}(A, n - x)] \quad (4.15)$$

onde :

- $A_e$  é o tráfego escoado pela estação base com um número  $x$  de canais indisponíveis por interferência;
- $A$  é o tráfego oferecido para a estação base em Erl;
- $n$  é o número de canais de voz da estação base;
- $x$  é o número de canais indisponíveis devido à interferência;
- $\text{Er}(A, n-x)$  é a equação de Erlang-B (4.10) que traduz na probabilidade de bloqueio para um tráfego oferecido  $A$  e um número  $(n-x)$  de canais.

A Figura 4.3 mostra o tráfego escoado para uma célula de 19 canais em função do tráfego oferecido, tendo as situações de 3, 5 e 7 canais bloqueados por interferência. A diferença entre o tráfego escoado para o mesmo tráfego oferecido nas diferentes situações de canais bloqueados significa perda efetiva de tráfego, em outras palavras, a empresa operadora

do serviço celular deixou de prover serviço e conseqüentemente perdeu a receita referente a este tráfego.



**FIGURA 4.3** Tráfego escorado em função do tráfego oferecido em uma célula de 19 canais sob condições de interferência.

Das Figuras 4.2 e 4.3 pode-se concluir que:

- Se o tráfego oferecido for muito menor do que o número de canais disponíveis, (por exemplo, tráfego oferecido inferior a 8 Erl para uma célula com 19 canais) a perda de tráfego escorado por indisponibilidade de alguns canais de voz é bem pequena, ou seja, o tráfego escorado nas condições de interferência e sem interferência são praticamente o mesmo, de maneira a não prejudicar a capacidade do sistema e nem o grau de serviço. Mas vale observar que esta situação, número de canais no sistema muito maior do que o tráfego oferecido, não é típica dos sistemas móveis, em que o comum é ter o número de canais por célula de forma a obter um grau de serviço de 2%.

- Se o tráfego oferecido for aumentando até próximo do número de canais da estação base, a perda de tráfego escoado começa a ser significativa e será tão maior quanto maior for o número de canais indisponíveis. Esta situação, em que o tráfego escoado é menor, mas próximo ao número de canais da estação base, é buscada no planejamento do sistema móvel celular. Logo, a perda de canais de voz por interferência causa perda de tráfego, assim como aumento do grau de serviço.
- Se extrapolarmos o tráfego oferecido para infinito, é fácil notar que a perda de tráfego escoado converge para o número de canais indisponíveis.

Para sabermos agora o novo grau de serviço da célula sob interferência basta aplicarmos a equação (4.10) (formula-B de Erlang) considerando os canais indisponíveis e um valor de tráfego oferecido típico da hora de maior movimento (HMM).

Por HMM entende-se o período contínuo de uma hora dentro de um intervalo de vinte quatro horas que o tráfego oferecido é máximo. Assim, o Grau de Serviço vale:

$$GS = p_b = \frac{A^{n-x} / (n-x)!}{\sum_{i=0}^{n-x} A^i / i!} \quad (4.16)$$

É fácil notar da equação (4.16) que a perda de tráfego escoado depende do tráfego oferecido à célula em questão, ou seja,  $A$ . Portanto o grau de serviço característico de uma célula é tomado na HMM da célula.

#### 4.2.2 PERDA DE RECEITA DEVIDO À INTERFERÊNCIA EM CANAIS DE VOZ

Se quisermos identificar a perda de receita devido ao tráfego bloqueado em células sob interferência, basta utilizar a equação (4.15) para os valores de tráfego oferecido referentes a cada hora do dia. Assim tem-se a informação de quanto do tráfego oferecido foi escoado, e por conseguinte, a perda de tráfego.



A seguir, será apresentado um método para se estimar a perda de tráfego e de receita com base no modelo de tráfego apresentado.

Primeiramente, precisa-se conhecer o perfil de tráfego oferecido típico da célula num período de 24 horas. Por tráfego oferecido típico, entenda-se o valor médio de tráfego oferecido naquele período excluindo os dias de baixo tráfego como os fins de semana e feriados. Depois, aplica-se o bloqueio ao tráfego oferecido para identificar o tráfego bloqueado. A seguir, soma-se o tráfego bloqueado no dia e converte o tráfego bloqueado total em minutos de conversação. Daí, tem-se a perda de tráfego e de minutos que está diretamente relacionado com a receita.

Os passos do método apresentado estão descritos a seguir:

- 1) Seja  $A_o(nT)$  o tráfego médio oferecido medido num período de uma hora, ou seja, no intervalo entre  $(n-1)T$  e  $(n)T$ , onde  $T$  representa uma hora e  $n$  é um inteiro entre 1 e 24;
- 2) Tomam-se medições de  $A_o(nT)$  nos cinco dias de maior tráfego da semana;
- 3) Tira-se a média dos valores de tráfego representativo de cada hora, ou seja,  $\bar{A}_o(nT)$ ;
- 4) Identifica-se o número de rádios (canais) que estão bloqueados por interferência constante  $[x(nT)]$ . O número de canais bloqueados por interferência pode ser diferente no mesmo dia. Por exemplo, a estação FM está desligada durante a madrugada;
- 5) Calcula-se o tráfego perdido em um dia devido ao bloqueio de canais de voz utilizando a expressão:

$$T_p = \sum_{n=1}^{24} \bar{A}_o(nT) \cdot p_b[\bar{A}_o(nT), (c - x(nT))] \quad (4.17)$$

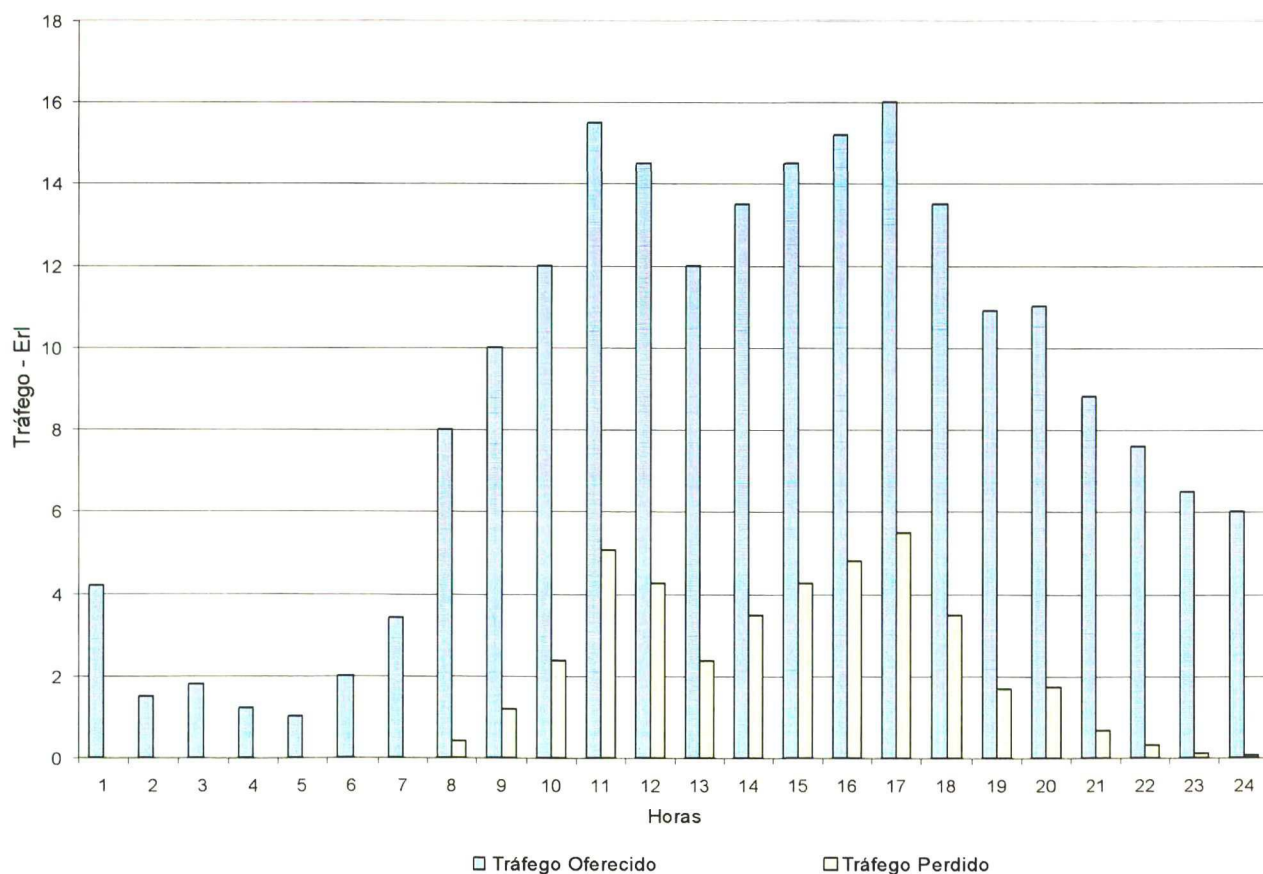
- 6) Calculam-se os minutos de conversação perdidos por dia ( $M_c$ ), convertendo a unidade de Erlangs em tempo:

$$M_c = T_p \times 60 \quad (4.18)$$

- 7) Calcula-se a perda de receita por dia ( $P_r$ ), aplicando o valor cobrado por minuto ( $VC1$ ):

$$P_r = M_c \times VC1 \quad (4.19)$$

Seja uma estação base com 19 canais, tendo 7 canais bloqueados por interferência, com o perfil de tráfego típico conforme a Figura 4.4. Seja o valor VC1 de R\$ 0,40 cobrado por minuto. O tráfego perdido por dia será de 41,72 Erl. Os minutos de conversação perdidos por dia totalizarão 2.503,47 min. A receita perdida por dia será de R\$ 1.001,39. Considerando somente os 22 dias comerciais no mês, a perda mensal será R\$ 23.031,93. Finalmente, a perda de receita anual será de R\$ 276.383,15.



**FIGURA 4.4** Perfil de tráfego oferecido típico de uma célula com 19 canais

#### 4.2.3 CONCLUSÕES PARA INTERFERÊNCIA EM CANAIS DE VOZ

Seguindo critérios de qualidade de sistemas móveis sugeridos por LEE (1990) (veja Capítulo 1) e sabendo-se que a categoria qualidade de serviço é composta pelos itens área de cobertura do sistema, grau de serviço e número de quedas de chamadas, verifica-se que o impacto da interferência em canais de voz em situações de alto tráfego é um fenômeno degenerativo da qualidade do sistema. Pois, como consequência da interferência, temos o aumento da probabilidade de bloqueio, em outras palavras, temos o aumento do insucesso de estabelecer uma chamada devido ao congestionamento de canais de voz. E, por conseguinte, uma perda de tráfego escoado.

De KUCAR apud GIBSON (1996), que considera que a medida da qualidade do serviço mais importante deve ser a satisfação dos clientes, é também fácil concluir que interferências em canais de voz são sentidas pelos clientes como um insucesso quando no estabelecimento de uma chamada, pois devido ao aumento do grau de serviço fica mais provável o bloqueio, ou a perda de uma chamada originada ou terminada.

Do ponto de vista da empresa operadora do serviço, este fenômeno, ou seja, perda de canais devido à interferência, representa perda de tráfego que, provavelmente, converte em perda de receita e aumento da insatisfação do cliente.

A análise feita aqui teve o objetivo de mostrar os efeitos em um sistema móvel celular devido à interferência em canais de voz. Os resultados mostrados não foram obtidos segundo critérios rigorosos, pois foi utilizado um modelo de tráfego que não leva em consideração alguns aspectos particulares dos sistemas móveis como hand-off.

Outros aspectos que não foram considerados são a retentativa dirigida e a retentativa do usuário face ao insucesso experimentado na primeira tentativa. Estes fatores tornariam a análise muito mais complexa. Apesar das aproximações feitas, a análise mostra resultados qualitativos suficientes para concluir que tais situações são fenômenos degenerativos da qualidade do sistema.



### 4.3 CONSEQUÊNCIAS DE INTERFERÊNCIA PARA O TRÁFEGO DE SINALIZAÇÃO

No canal de controle de uma estação base trafegam mensagens que gerenciam todos usuários servidos pela célula, pois todas as chamadas iniciadas pelos usuários ou destinadas a eles se processam a partir deste canal. Logo, a ocorrência de interferência no canal de controle, dependendo de sua intensidade, pode provocar sérios distúrbios na área servida por esta estação base, além de afetar todos os usuários que se encontram nela.

Como todas as comunicações efetuadas no canal de controle são digitais, o critério de medir a qualidade da comunicação é feita através da probabilidade de erro de bit. Conforme LATHI (1968, p 234) a probabilidade de erro é o critério mais significativo para a detecção de sinais em sistemas digitais, pois segundo o autor:

“Em sistemas digitais, o problema de detecção é algo mais simples do que em sistemas contínuos. Durante a transmissão, as formas de onda são corrompidas pelo ruído do canal. Quando um sinal é recebido pelo receptor, nós precisamos decidir qual das  $n$  possíveis formas de onda conhecidas foram transmitidas. Uma vez que esta decisão é feita, a forma de onda transmitida é regenerada exatamente sem nenhum ruído. O ruído do canal não tem influência neste sentido. Entretanto, o ruído do canal poderá causar certo erro em nossa decisão. Nós podemos, por exemplo, ser confundidos pelo ruído e tomar uma decisão errada. Então, temos que aceitar que algumas decisões serão erradas e que o erro aumentará com o aumento do ruído.”

Logo, pode-se observar que interferência no canal de controle, ou seja, ruído adicionado por outro sistema de comunicação na mesma faixa de frequência do sistema sob interferência, provoca um aumento na probabilidade de erro de bit, que significa a chance de um bit ser detectado errado e, conseqüentemente, as mensagens que são transmitidas podem ser descartadas por erro e não ter sua função executada, como um pedido de chamada ou uma terminação de chamada para um usuário móvel. Portanto, isto implica em uma diminuição na qualidade do sistema móvel celular.

#### 4.3.1 DEGRADAÇÃO DO TRÁFEGO DE SINALIZAÇÃO DO SISTEMA CELULAR SOB INTERFERÊNCIA

Para YACOUB (1993), a probabilidade de ocorrência de erro em sistemas binários, como é o caso do sistema AMPS referente ao tráfego de sinalização, depende da razão entre a

energia por bit e a potência de ruído. O autor mostra que, para detecção FSK não coerente, esta probabilidade é

$$\text{prob}(\text{erro}|\gamma_b) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{1}{2}\gamma_b\right) \quad (4.20)$$

onde  $\gamma_b$  é a razão sinal ruído (SNR). Conseqüentemente, a probabilidade de erro incondicional é

$$\text{prob}(\text{erro}) = \int_0^{\infty} \text{prob}(\text{erro}|\gamma_b) p(\gamma_b) d\gamma_b \quad (4.21)$$

onde  $p(\gamma_b)$  é a densidade de probabilidade de  $\gamma_b$ .

Logo, para analisar o impacto no sistema devido à interferência no canal de controle é necessário conhecer a SNR, ou seja, sua distribuição de probabilidade.

A partir daí, determina-se a probabilidade de erro de bit na detecção do sinal FSK. Com o conhecimento da probabilidade de erro de bit, o código empregado para a mensagem e o formato da mensagem é possível determinar a probabilidade de erro no envio de mensagens pelo canal sob interferência.

De outro modo, a probabilidade de erro na comunicação da mensagem se traduz no sucesso ou insucesso de executar as funções de origem e terminação de chamadas, ou seja, o usuário é impedido de iniciar ou receber uma chamada devido à interferência do canal de controle.

Devido ao fato de este trabalho tratar da interferência sentida pela estação base, as análises de probabilidade de erro serão limitadas às mensagens que trafegam no canal de controle reverso (RECC), pois será esta comunicação a única afetada.

Todas as mensagens que trafegam pelo canal RECC podem ser corrompidas. Em outras palavras, todas as funções como acesso, resposta à busca e ordens trocadas entre a estação base e as estações móveis serão afetadas e, conseqüentemente, ter-se-á uma degradação do sistema.

Assim, de posse da probabilidade de erro de mensagem é possível determinar qual a probabilidade de insucesso na origem e terminação de chamadas devido ao erro de comunicação no canal de controle.

#### **4.3.2 MÉTODO PARA IDENTIFICAR A PROBABILIDADE DE INSUCESSO NA ORIGEM E TERMINAÇÃO DE CHAMADAS**

Para chegar ao comportamento estatístico da razão sinal-ruído é necessário conhecer as características do sinal e do ruído, ou seja, a distribuição de probabilidade do sinal e do ruído no receptor da estação base.

O comportamento do sinal interferente, sinal proveniente da estação comercial de FM, não pode ser obtido deterministicamente devido a sua dependência com o espectro do sinal modulante. Ou seja, a densidade espectral do sinal harmônico depende exclusivamente da densidade espectral do sinal modulado em FM e este, por sua vez, depende do sinal modulante que é variante no tempo.

Entretanto, é possível obter a distribuição de probabilidade de potência do sinal interferente dentro da banda de frequência desejada, ou seja, a faixa de 30 kHz referente ao canal de controle do sistema AMPS. Isto pode ser obtido experimentalmente através de medições de potência no receptor do canal de controle de modo a levantar um histograma da potência do sinal provindo da estação FM.

Assim, emprega-se uma maneira de medir a potência do ruído  $N$  presente na faixa limitada pelo filtro de FI do receptor, esse ruído representa a potência do sinal interferente somado aos demais ruídos inerentes ao ambiente de comunicação móvel. Daí, é possível fazer várias medidas de modo a obter uma relação entre a potência do ruído medido (sinal interferente adicionado ao ruído) e a frequência de ocorrência de cada valor medido (considerando as medidas em valores inteiros em dBm).

Desta forma, obtém-se um histograma. Assim, pode-se estimar o diagrama de probabilidade do ruído, fazendo a divisão dos valores da frequência de ocorrência dos valores medidos pelo número total de experimentos ou de medidas.



A potência com que os sinais enviados pelos usuários chegam no canal de controle depende de vários fatores. Os principais estão relacionados com as condições de propagação no espaço livre.

A razão entre a potência recebida e a potência transmitida nessas condições, conhecida como fórmula de transmissão no espaço livre de Friis, (YACOUN, 1993), mostrada abaixo, relaciona a potência recebida com a potência transmitida, comprimento de onda da portadora, ganho das antenas de recepção e transmissão e a distância entre as antenas.

$$\frac{W_r}{W_t} = G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (4.22)$$

onde  $W_r$  e  $W_t$  são: a potência do sinal recebido e a potência do sinal transmitido, respectivamente;  $G_t$  e  $G_r$  o ganho da antena transmissora e ganho da antena receptora, respectivamente;  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $d$  é a distância entre as antenas.

RAPPAPORT (1996) descreve três mecanismos básicos que influenciam a propagação do sinal num sistema de comunicação móvel: reflexão, difração e espalhamento. A reflexão ocorre quando a onda eletromagnética caminante incide sobre um objeto de dimensão muito maior do que o comprimento de onda do sinal. A difração ocorre quando o caminho de rádio entre o transmissor e o receptor é obstruído por um corpo denso com dimensões maiores comparado com o comprimento de onda, ocasionando a formação de ondas secundárias que serão formadas atrás do obstáculo. O espalhamento ocorre quando a onda de rádio incide tanto sobre superfícies rugosas, de grandes dimensões, quanto em objetos de dimensões da ordem do comprimento de onda ou menor, ocasionando o espalhamento da energia do sinal em todas as direções.

SKLAR (1997) apresenta a característica de que o sinal em um sistema de comunicação móvel pode viajar do transmissor para o receptor por vários caminhos diferentes, via reflexões. Este efeito pode provocar flutuações de amplitude, fase e ângulo de chegada do sinal recebido, dando origem à terminologia de desvanecimento por múltiplo percurso (*multipath fading*).

Além disso, YACOUB (1993) mostra que outros fatores também influenciam o sinal recebido. São eles: condições atmosféricas, vegetação, orientação das ruas e túneis.

Todos estes fatores fazem com que o sinal proveniente dos usuários cheguem com diferentes níveis de potência ao receptor. Além disso, para um mesmo usuário, o sinal recebido na estação base sofre variações no tempo. YACOUB (1993) mostra que devemos tratar o sinal em bases estatísticas e interpretar os resultados como eventos aleatórios que ocorrem com uma dada probabilidade.

Existem vários modelos para descrever o comportamento do sinal recebido. YACOUB (1993) apresenta três modelos que são bem relacionados com as estatísticas de rádio móvel. A distribuição lognormal, Rayleigh e Rician. A distribuição lognormal descreve o envelope do sinal recebido obstruído por obstáculos como prédios e montanhas. A distribuição Rayleigh descreve o envelope do sinal recebido resultante de multipercurso. A distribuição Rician considera o envelope do sinal que sofre propagação por multipercurso mais um componente resultante de linha de visada.

Apesar das distribuições apresentadas descreverem o comportamento estatístico do envelope do sinal recebido, a distribuição do sinal que buscamos neste trabalho não estará relacionada com essas distribuições. Pois, as distribuições apresentadas descrevem o comportamento do sinal proveniente de um único usuário. Neste trabalho, estamos interessados na estatística do sinal recebido no canal de controle que são provenientes de todos os usuários servidos pela célula.

Ora, como todos usuários estarão em lugares diferentes e conseqüentemente estarão sob condições de caminho de rádio diferentes, o que interessa é o valor de potência média do sinal recebido de cada usuário. E, o conjunto destes valores tornará possível estimar a distribuição de probabilidade da potência do sinal recebido no canal de controle da estação base. Portanto, a distribuição de probabilidade da potência do sinal recebido no canal de controle necessariamente não seguirá uma das distribuições apresentadas acima.

Logo, necessita-se estimar a distribuição de probabilidade do sinal lançando mão dos métodos experimentais. A mesma maneira usada para conhecer a distribuição do ruído deve ser empregada para adquirir amostras do sinal no receptor da estação base, de modo a levantar

o histograma dos sinais provenientes dos acessos das estações móveis. Fazem-se várias medidas do sinal durante os momentos de acesso do canal de controle, sendo as medidas tomadas em valores inteiros em dBm. A seguir levanta-se a função de distribuição de probabilidade do sinal.

Nos sistemas celulares fornecidos pelo fabricante Ericsson, por exemplo, essas medidas podem ser feitas através de programas de medição implementado na Central de Comutação e Controle, em que é usado o próprio rádio que faz a função de canal de controle para realizar tais medidas tendo os resultados armazenados em registradores. O programa de medição mencionado é denominado “Mobile Telephony Radio Environment Statistics Measuring Program”.

Já o fabricante Lucent possui esta mesma facilidade sob o nome PLM (Power Level Measurement), que desempenha a mesma função, permitindo que sejam programadas medições de potência no receptor da estação base. O resultado destas medidas já vem na forma de histograma.

Para que as medidas sejam válidas é necessário tomar alguns cuidados. Por exemplo, durante a medição do sinal é preciso que o sistema não esteja sofrendo interferência e a medição do ruído deve ser feita em intervalos livres de acesso no canal RECC.

Conhecendo o comportamento estatístico do sinal e do ruído é possível determinar a distribuição de probabilidade da SNR como mostrado a seguir.

Sejam  $S$  e  $N$  variáveis aleatórias independentes que representam a potência recebida no receptor em dBm do Sinal e Ruído, respectivamente. E  $p_s(s)$  e  $p_n(n)$  as funções de densidade de probabilidade correspondentes.

A razão sinal ruído, ou seja, SNR, também pode ser representada em dB, onde  $SNR [dB] = S[dBm] - N[dBm]$ . Então, expressando  $SNR [dB]$  como uma variável aleatória  $z$ , resulta na seguinte expressão:  $z = s - n$  e  $p_z(z)$  a função de densidade conjunta de  $s$  e  $n$  que representa a função de densidade da SNR.



Então, precisamos conhecer a densidade  $p_z(z)$  em termos das funções de densidade de  $p_s(s)$  e  $p_n(n)$ .

Segundo PAPOULIS (1965) para determinar a densidade de probabilidade de uma função  $z = g(x, y)$  de duas variáveis aleatórias  $x$  e  $y$  introduz-se uma variável auxiliar de modo a expressar a densidade  $p_z(z)$  da variável aleatória  $z$  diretamente em termos da densidade conjunta  $p_{sn}(s, n)$  e  $J(s, n)$ , onde o operador  $J$  é o *Jacobiano* da transformação  $z = s - n$ .

Então, façamos

$$\begin{cases} w = -n \quad \therefore n = -w \\ z = s - n \quad \therefore s = z + n \quad \therefore s = z - w \end{cases}$$

$$p_{zw}(z, w) = |\det J|^{-1} p_{sn}(s, n) \quad (4.23)$$

como  $s$  e  $n$  são independentes, então  $p_{sn}(s, n) = p_s(s)p_n(n)$ , logo

$$p_{zw}(z, w) = |\det J|^{-1} p_s(s)p_n(n) \quad (4.24)$$

Resolvendo o operador  $J$

$$J_{(s,n)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial s}{\partial z} & \frac{\partial s}{\partial w} \\ \frac{\partial n}{\partial z} & \frac{\partial n}{\partial w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \therefore |\det J| = 1$$

Então, resolvendo a função de densidade de  $z$ ,

$$p_{zw}(z, w) = p_s(s)p_n(n) \quad (4.25)$$

$$p_z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{zw}(z, w)dw \quad (4.26)$$

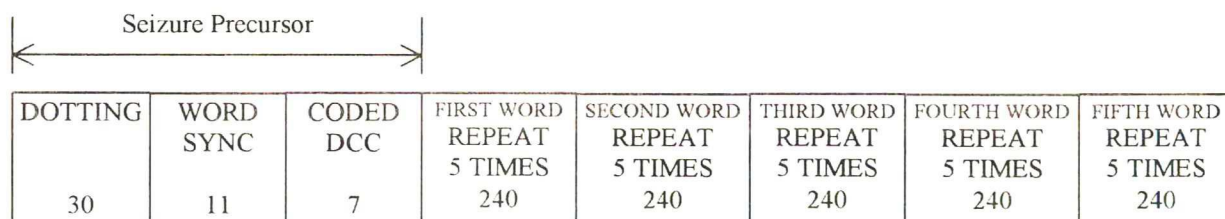
Substituindo (4.25) em (4.26) e procedendo a troca de variáveis  $s$  e  $n$  por  $z$  e  $w$ , resulta:

$$p_z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} p_s(z-w)p_n(-w)dw \quad (4.27)$$

Nos casos práticos, onde as variáveis de potência são representadas por valores discretos de potência, basta substituir a integral da equação (4.27) por um somatório, resultando na seguinte expressão:

$$p_z(z) = \sum_{w=-\infty}^{\infty} p_s(z-w)p_n(-w) \quad (4.28)$$

Para determinar a probabilidade de erro de mensagens, é preciso conhecer a probabilidade de erro de cada campo da mensagem. Pois, para cada campo da mensagem há um código de canal empregado junto com outros artifícios para proteção contra erros de bit.



**FIGURA 4.5** Formato da mensagem no canal RECC

A mensagem do RECC, apresentada na Figura 4.5, é composta pelo *Seizure Precursor* e pelos campos das palavras de informação. *Seizure Precursor* é o cabeçalho de ocupação da mensagem em que são carregadas as informações de sincronismo e controle da mensagem propriamente dita.

Para a transmissão das palavras de informação é utilizada a técnica de múltipla repetição em conjunto com o código BCH, já apresentados na Seção 2.6 deste trabalho.

Na técnica de múltipla repetição, cada bit é transmitido um número ímpar de vezes e na recepção uma decisão pela maioria é tomada. Assim, se  $s$  é o número de repetições, um processo de decisão pela maioria do tipo  $(s + 1) / 2$  é empregado.



No caso do padrão AMPS, cada bit da palavra de informação é enviado 5 vezes. Logo, a probabilidade de erro de bit,  $p'$ , usando a técnica de múltipla transmissão, é a probabilidade que pelo menos 3 erros ocorram nas 5 repetições, ou seja:

$$p' = \sum_{i=3}^5 \binom{5}{i} p^i (1-p)^{5-i} \quad (4.29)$$

onde  $p$  é a probabilidade de erro de bit na recepção FSK não-coerente.

A probabilidade de erro de uma palavra de informação  $p_w$ , agora combinada com o código BCH (48,36,5), é

$$p_w = 1 - \sum_{m=0}^t \binom{N}{m} (1-p')^{N-m} p'^m \quad (4.30)$$

onde  $p'$  é a probabilidade de erro de bit considerando o processo de múltipla repetição e  $t$  é igual a 2 para o código BCH empregado.

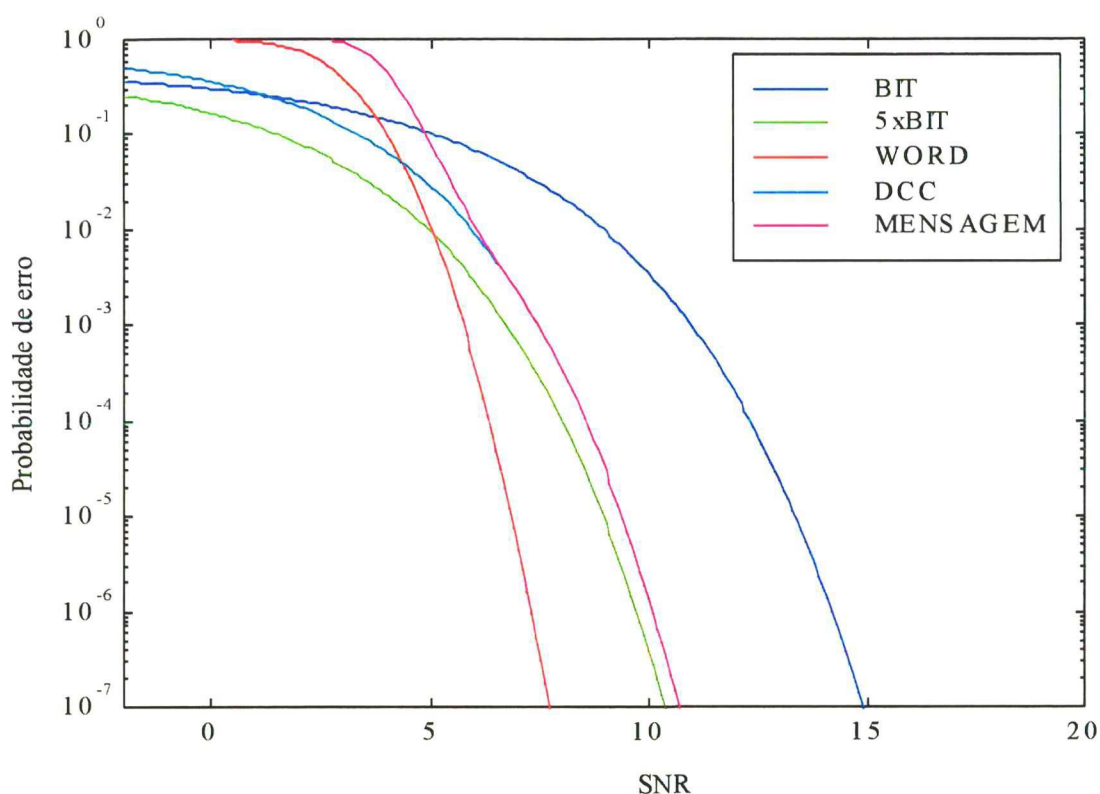
A palavra do DCC (Digital Color Code) transmitida no RECC utiliza 7 bits correspondendo a um código de bloco (7,2,4) com uma distância mínima  $d_{\min} = 4$ . A probabilidade de erro no DCC para o código empregado é:

$$p_{\text{DCC}} = 1 - \sum_{m=0}^t \binom{N}{m} (1-p)^{N-m} p^m \quad (4.31)$$

onde  $N = 7$ ,  $t = 2$  e  $p$  é a probabilidade de erro de bit para recepção FSK não-coerente. Aqui, a técnica de múltipla repetição não é empregada.

Logo, a probabilidade de erro de uma mensagem de origem ou de resposta à busca, desconsiderando que possíveis erros na palavra de sincronismo ocasione a perda da mensagem, é:

$$p_m = 1 - \left[ (1 - p_{\text{DCC}})^5 (1 - p_w)^5 \right] \quad (4.32)$$



**FIGURA 4.6** Probabilidades de erro de: bit, bit com múltipla repetição, palavra codificada com repetição de bit, DCC e mensagem do canal RECC, para detecção não-coerente de um sistema FSK.

A Figura 4.6 mostra a probabilidade de erro da mensagem para diversos valores de razão sinal-ruído. Da Figura 4.6, nota-se que valores de razão sinal-ruído inferiores a 13 dB implica em um aumento abrupto da probabilidade de erro da mensagem que trafega no canal RECC. Por exemplo, para uma  $SNR = 11$  dB, a probabilidade de erro de bit e de mensagem valem, respectivamente,  $9,23 \times 10^{-4}$  e  $2,75 \times 10^{-8}$ . Já para uma SNR de 3 dB abaixo, ou seja 8 dB, as mesmas probabilidades de erro são  $2,13 \times 10^{-2}$  e  $3,18 \times 10^{-4}$ .

Além disso, nota-se que a probabilidade de erro de mensagem é ditada pela probabilidade de erro do campo DCC para razões sinal-ruído superiores a 7 dB.

Contudo, a análise da probabilidade de erro de mensagem feita para o canal RECC não considera o insucesso na recepção da mensagem por falha na função de sincronismo.

Para considerar o sincronismo como um fator que leva a mensagem a ser descartada é preciso identificar os padrões de erro na palavra de sincronismo que causam erro na recepção da mensagem.

Infelizmente esta informação não foi encontrada na literatura pesquisada. Então, utilizaremos uma análise considerando a palavra de sincronismo como parte da mensagem em que serão admitidas algumas condições de erro.

Para o receptor entender os dados que chegam é preciso que ele esteja sincronizado com a estrutura de dados que formam a mensagem.

Quando o receptor começa a receber os dados, ele faz a correlação entre o padrão conhecido da palavra código de sincronismo com os dados que chegam. Se o receptor não está em sincronismo com a estrutura do quadro de dados, a correlação será baixa. Quando o receptor encontra a palavra código de sincronismo, a correlação deve ser máxima, a menos que haja algum erro na palavra código. Assim, estando o receptor em sincronismo, as palavras que compõem a mensagem do RECC, propriamente dita, começam a ser decodificadas.

Segundo SKLAR (1988), existem duas probabilidades que caracterizam o desempenho de um sistema usando a palavra código de sincronismo. São a probabilidade de perda de detecção (probability of a missed detection) e a probabilidade de falso alarme (probability of false alarm).

A probabilidade de perda de detecção para uma palavra de N-bits, onde k erros ou menos são aceitos, é dada por:

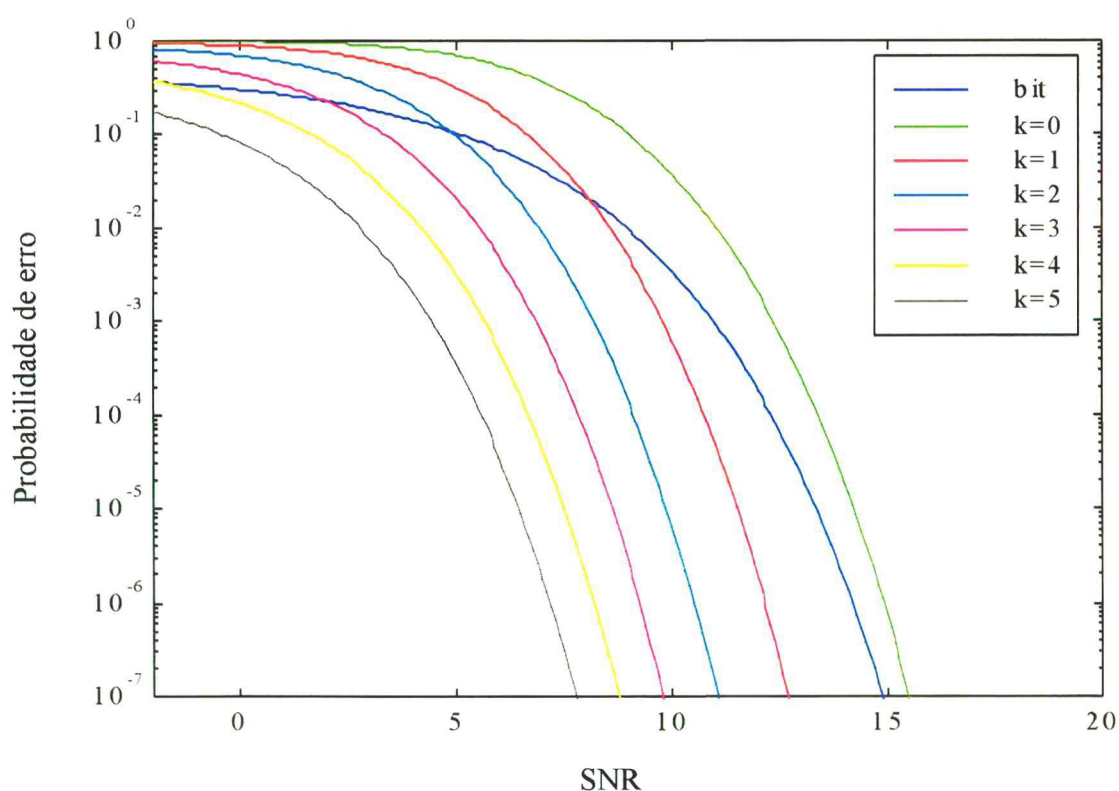
$$p_d = \sum_{j=k+1}^N \binom{N}{j} p^j (1-p)^{N-j} \quad (4.33)$$

onde p é a probabilidade de erro de bit. A probabilidade de falso alarme gerado por N bits de um feixe de dados aleatório é:

$$p_{FA} = \sum_{j=0}^k \frac{\binom{N}{j}}{2^N} \quad (4.34)$$

Deseja-se que ambas sejam baixas, no entanto são condições conflitantes. Pois, para diminuir a probabilidade de perda de detecção, deve-se admitir uma correlação menor para a palavra código de sincronismo. Isto é, uma palavra deve ser aceita mesmo contendo alguns erros. Logo, existirão mais do que um único padrão de símbolos que serão aceitos como palavra código de sincronismo e, conseqüentemente, a probabilidade de falso alarme aumentará.

A Figura 4.7 mostra a probabilidade de perda de detecção da palavra código de sincronismo utilizada no AMPS, ou seja, a palavra código de Barker de comprimento  $N = 11$ . Para isso, admite-se que, mesmo que ocorra até  $k$  bits errados, para valores de  $k$  entre 0 e 5, a função de sincronismo é realizada. A probabilidade de erro está mostrada em função da razão sinal-ruído para um receptor FSK não-coerente.



**FIGURA 4.7** Probabilidade de erro de bit para recepção FSK não-coerente e probabilidade de perda de detecção da palavra de sincronismo para vários valores de  $k$ .



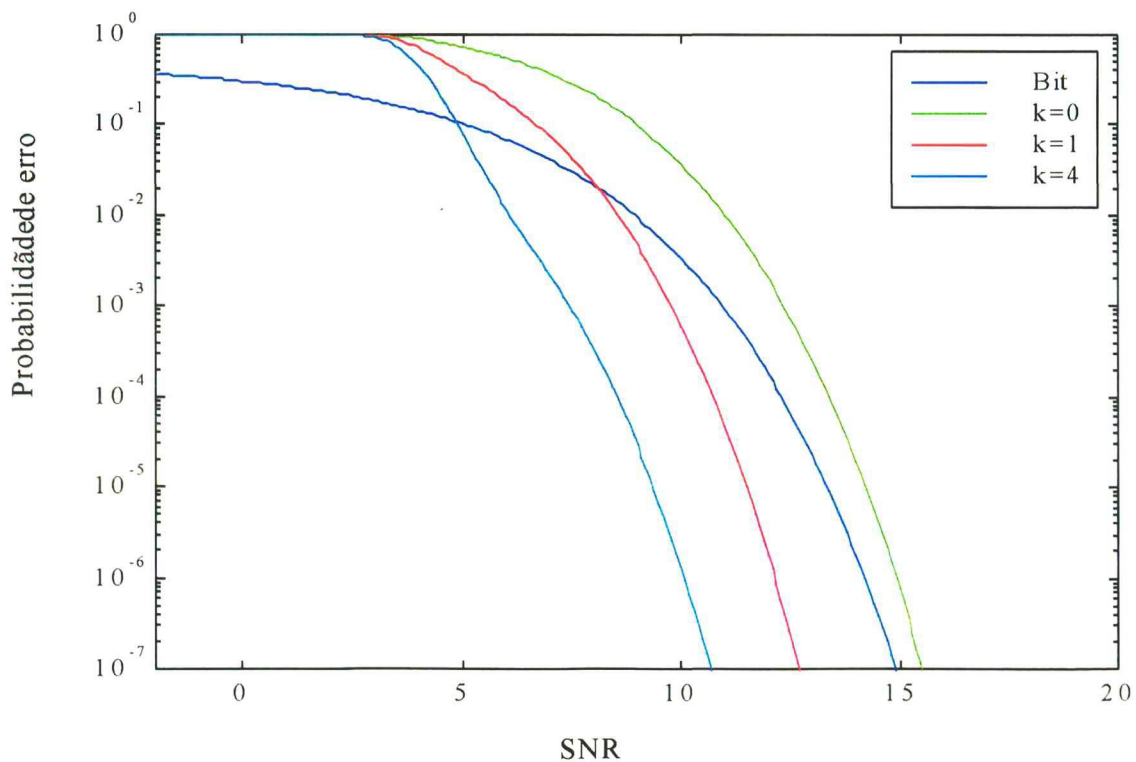
Agora, admitindo que alguns padrões de erros na palavra de sincronismo podem ocasionar a rejeição da mensagem recebida, a probabilidade de erro de mensagem no canal RECC é:

$$p_{\text{mes}} = 1 - (1 - p_d)(1 - p_m) \quad (4.35)$$

onde  $p_d$  é a probabilidade de erro da palavra código de sincronismo e  $p_m$  é a probabilidade de erro dos campos DCC e as cinco palavras que compõe a mensagem do RECC.

Portanto, a probabilidade de rejeição da mensagem no canal RECC pode ser determinada em função da quantidade de erro que admite-se para a palavra de sincronismo.

A Figura 4.8 mostra a probabilidade de erro na recepção da mensagem no canal RECC para três condições. A primeira, para  $k$  igual a 0, nenhum erro de bit é admitido na palavra de sincronismo. A segunda, para  $k$  igual a 1, admite-se que um erro pode ocorrer. Por fim, para  $k$  igual a 4, admite-se que até 4 erros podem ocorrer na palavra de sincronismo sem que a mensagem seja descartada.



**FIGURA 4.8** Probabilidade de erro de mensagem no canal RECC para diferentes condições de erro na palavra de sincronismo.

Finalmente, tem-se a probabilidade de insucesso na origem e terminação de chamada representada pela probabilidade de erro de mensagem no canal RECC considerando todos os campos da mensagem.

Para comparar a influência da palavra de sincronismo na probabilidade de erro, tomemos o exemplo anterior para razões sinal-ruído de 11 e 8 dB e admitindo um bit errado na palavra de sincronismo ( $k = 1$ ). Os novos valores para probabilidade de erro de mensagem no canal RECC são respectivamente  $9,23 \times 10^{-4}$  e  $2,23 \times 10^{-2}$ . Em comparação com os valores mostrados anteriormente ( $2,75 \times 10^{-8}$  e  $3,18 \times 10^{-4}$ ), nota-se que a palavra de sincronismo exerce uma degradação na probabilidade de erro de mensagem no canal RECC.

Resumindo, o processo de identificação da probabilidade de insucesso na origem e terminação de chamadas passa pelas seguintes etapas:

- 1) Determinar a função de probabilidade da potência do sinal no canal RECC.
- 2) Determinar a função de probabilidade da potência do ruído no canal RECC.
- 3) Determinar a função de probabilidade da razão sinal-ruído.
- 4) Determinar a probabilidade de erro de bit em função da distribuição de probabilidade da SNR.
- 5) Determinar a probabilidade de erro em cada campo da mensagem no canal RECC.
- 6) Determinar a probabilidade de erro da mensagem no canal RECC que representa a probabilidade de insucesso na origem e terminação de chamadas.

#### 4.4 CONCLUSÕES

Nesse capítulo, tratamos dos ruídos e interferências que estão sujeitos os sistemas celulares, em especial o padrão de sistema AMPS. Alguns dos principais ruídos são os ruídos

provenientes de atividades humanas, provindo da atmosfera, da galáxia, do receptor, produtos de intermodulação e sinais indesejáveis de outros sistemas de comunicação. Além desses, destacam-se os ruídos característicos da modulação FM empregada no padrão AMPS, como o FM aleatório, o ruído click e o ruído gerado pela diferença das portadoras do sinal e do sinal co-canal proveniente do próprio sistema celular.

A interferência provocada por estações comerciais FM foi classificada como um ruído aditivo no sistema celular e suas consequências foram analisadas sob dois aspectos:

O primeiro, tratada a consequência em canais de voz. Para isso, um modelo de tráfego baseado nas filas Markovianas foi empregado para analisar o impacto no grau de serviço da célula sob interferência. Além disso, foi abordada a perda de tráfego escoado e, por conseguinte, a perda de receita. Para a análise de perda de tráfego, um método prático foi apresentado com base no perfil de tráfego oferecido à célula sob interferência.

O segundo aspecto, refere-se às consequências de interferência no canal de controle da célula, ou seja, no canal lógico denominado RECC (Reverse Control Channel). Degradação de desempenho no canal de controle traz sérios danos aos usuários servidos pela célula, pois todas as chamadas iniciadas dependem da troca de informações que ocorrem por este canal. Esta degradação, representada pela probabilidade de sucesso na origem de chamadas, foi analisada levando em consideração as estatísticas do sinal e ruído, o tipo de modulação, o formato dos sinais, o código empregado e a estrutura de mensagens que trafegam no canal de controle.

Foi abordada a dificuldade em conhecer as estatísticas do sinal e do ruído e uma forma de levantamento experimental foi apresentada, utilizando facilidades das centrais de comutação e controle.

## **CAPÍTULO 5**

### **5 ESTUDO DE CASO : JOINVILLE MORRO**

#### **5.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA CELULAR E DA ESTAÇÃO FM**

A estação rádio base de Joinville Morro é uma estação entre as 6 existentes no sistema celular que atende a cidade de Joinville, SC. A base de usuários é de 8725 (dados referentes a 30/08/96).

Esta estação operada pela TIM Telesc Celular, empresa que opera a banda A na região do estado de Santa Catarina, é equipada com 56 canais de voz, um canal de controle e antenas omnidirecionais.

A estação, denominada Joinville Morro, vinha sendo interferida pela estação de FM Jovem Pan. Com a torre de difusão situada a 100 metros da estação celular, a rádio operava na frequência de 104,3 MHz com um estágio de amplificação de potência de saída de 10 kW.

#### **5.2 O PROBLEMA**

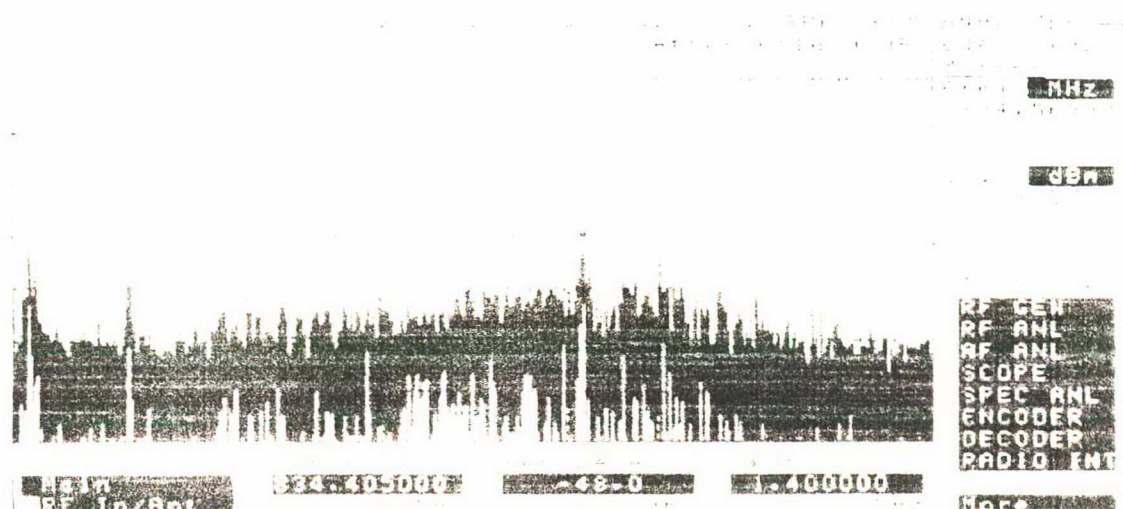
O problema de interferência foi detectado tendo em vista três anomalias no sistema: (i) constatação de seis canais de voz bloqueados constantemente; (ii) alarme de interferência no canal de controle acima do limiar normal durante os instantes livres de acesso, e (iii) um aumento significativo de reclamações de usuários na região.

Com isso, foram feitas investigações no espectro de frequência a fim de verificar se havia realmente interferência na faixa utilizada pela estação base celular, e, se verdadeiro, identificar a fonte geradora de interferência.

Após esta investigação, foi detectada uma faixa de frequência interferida, compreendida entre 833,68 MHz e 835,12 MHz. Usando demodulador de FM no analisador de espectro foi possível identificar que o sinal vinha da estação de FM Jovem Pan.



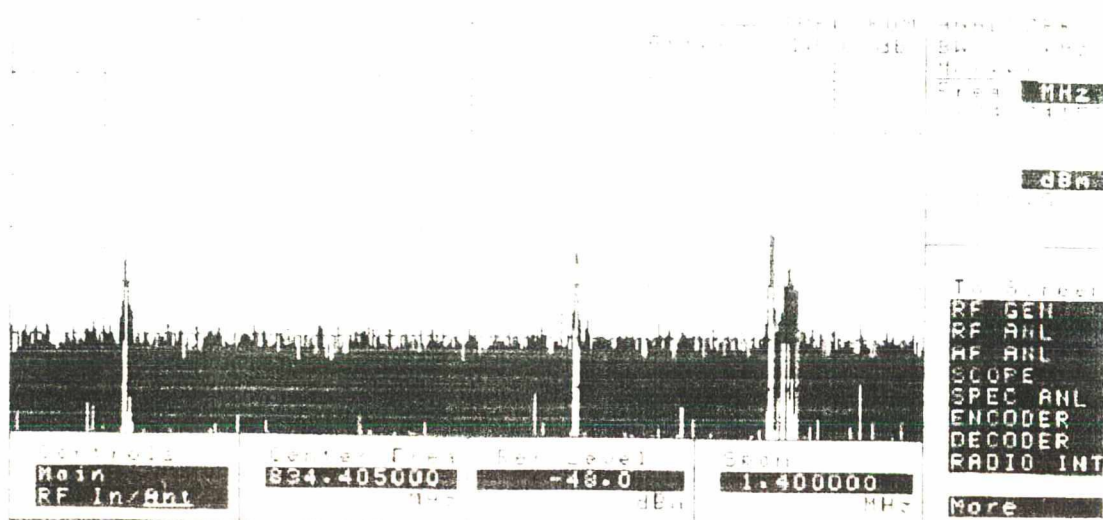
A Figura 5.1 mostra a tela do analisador de espectro em um determinado instante. O analisador estava acoplado à antena de recepção da estação base celular.



**FIGURA 5.1** Espectro de frequência com interferência da estação FM e percebido pelo receptor da estação celular

Nesta condição, a estação celular e a estação FM estavam em operação normal. A portadora identificada pela marca do analisador corresponde ao canal de controle da estação base, onde ocorreu um acesso de algum usuário. A faixa em torno do canal de controle encontra-se sob interferência provinda da estação FM. As duas portadoras na lateral esquerda do analisador correspondem a duas portadoras de canal de voz.

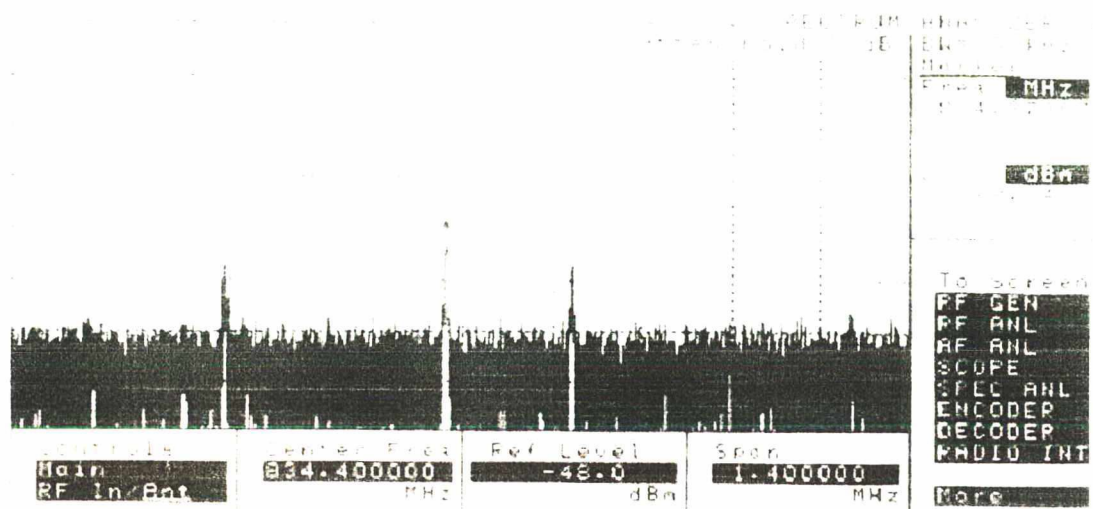
Para fins de comparação, o mesmo espectro foi analisado, mas agora com a estação FM desligada. A Figura 5.2 mostra a tela do analisador de espectro, que representa o espectro de frequências típico da banda celular sem interferência de fontes externas.



**FIGURA 5.2** Espectro de frequência sem interferência percebido pelo receptor da estação celular

A comprovação da fonte interferidora ser por motivo de harmônico gerado pelo transmissor da estação de FM foi feita de duas formas. Numa primeira, mediu-se o espectro de frequência na estação rádio base, estando a estação FM somente com a portadora ligada, sem modulação, conforme verificado na Figura 5.3. Na segunda forma foi realizada uma medida de potência na saída do transmissor da estação FM na frequência de 834,4 MHz com um filtro de FI de 30 kHz. Foi verificado que o sinal da 8ª harmônica estava presente.

Devido ao fato que o ponto de medição utilizado foi um ponto de teste na saída do amplificador, com alta perda de acoplamento, a potência medida da 8ª harmônica foi feita em relação à potência da portadora. A diferença entre a portadora fundamental e a 8ª harmônica foi de 84 dB. O valor encontrado de 84 dB pode conter uma componente de erro devido ao fato que o ponto de teste apresenta perda de acoplamento dependente da frequência do sinal sob análise. Mesmo assim, é possível verificar que o sinal interferente corresponde ao sinal harmônico da transmissora FM com uma potência suficiente para interferir nos sistemas celulares.



**FIGURA 5.3** Espectro de frequências percebido pelo receptor da estação celular com a portadora da estação FM ativada sem modulação.

O sinal da portadora da rádio sem modulação era recebido pela estação rádio base com potência de  $-88$  dBm na frequência de 834,4 MHz, conforme mostrado na Figura 5.3. Com modulação, a banda do sinal FM compreendia a faixa entre 833,68 a 835,12 MHz, representando 48 canais AMPS, inclusive todos os canais de controle da banda A.

Dos 56 canais utilizados na estação celular, 6 estavam sob interferência da estação FM. Em outras palavras, o nível de potência sentida pela estação celular nestes 6 canais, nos momentos livres de conversação, estava acima do limiar mínimo no qual a estação base entende como interferência. Este limiar pode ser definido pelo operador do sistema celular. O valor recomendado pelo fabricante é em torno de  $-106$  dBm.

No caso do equipamento Ericsson, o rádio sob interferência fica em estado de bloqueio, ou seja, indisponível para uso em conversações.

Além dos canais de voz, o canal de controle estava sob interferência. Num primeiro passo, a equipe de operação do sistema tentou mudar o número do canal de controle para alguns outros valores da faixa de canais de controle. Mas, não obtiveram sucesso pois, o sinal interferidor estava presente em toda a faixa. Associados com o problema de canal de controle,



estavam as reclamações de usuários que não tinham sucesso em iniciar chamadas ou serem chamados.

Além da insatisfação de usuários atendidos pela estação Joinville Morro, constatou-se diminuição de tráfego escoado em função dos canais bloqueados.

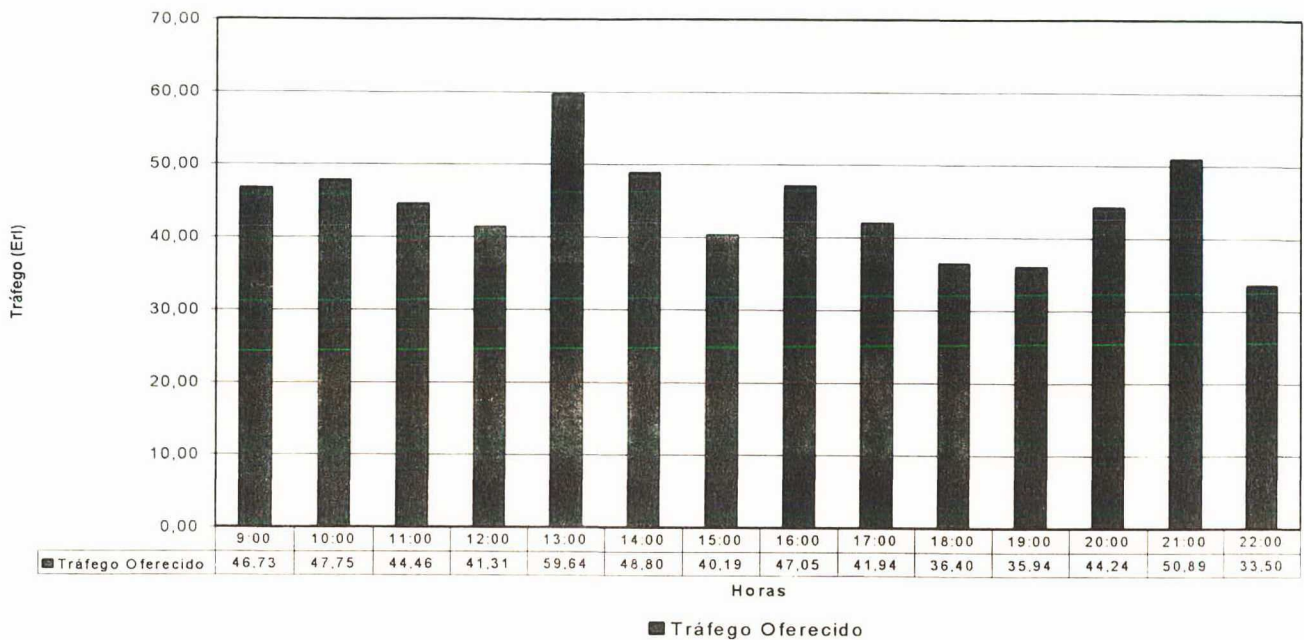
### **5.3 DEGRADAÇÃO DO SISTEMA DEVIDO À INTERFERÊNCIA NOS CANAIS DE TRÁFEGO DE VOZ**

Devido à ação do sistema celular em bloquear o rádio para comunicação quando detectados níveis de potência de sinais indesejáveis, a degradação do sistema celular será analisada em três aspectos: o grau de serviço, que representa um fator de qualidade do sistema; a perda de tráfego escoado pela estação sob interferência; e a perda de receita da operadora.

#### **5.3.1 GRAU DE SERVIÇO**

O grau de serviço atribuído à célula representa a probabilidade de bloqueio de uma chamada chegar e não encontrar um canal de tráfego de voz livre, ou seja, todos os recursos de comunicação da célula estão ocupados.

A Figura 5.4 mostra as condições de tráfego típico oferecido para a célula Joinville Morro (JVE0). No período onde ocorreu o problema, os relatórios eram tirados somente às quinta feiras. Por isso, não se pode estimar o valor médio de cada hora considerando os cinco dias de maior tráfego na semana. Além disso o período de análise limitava-se entre 8:00 e 22:00 horas. Portanto, será utilizado o tráfego de um dia de medida como característico da célula.



Fonte: TIM Telesc Celular. Relatório de tráfego, Mar/97

**FIGURA 5.4** Tráfego oferecido para a Célula JVE0

O tráfego mostrado na Figura 5.4 refere-se a um período de uma hora a terminar no valor indicado da hora na Figura. Isto é, o tráfego de 46,73 Erl as 9:00h refere-se ao tráfego no período entre 8:00 e 9:00 horas.

Utilizando o perfil de tráfego da célula JVE0 mostrado na Figura 5.4, verifica-se que o tráfego oferecido na HMM da célula é 59,64 Erl. Fazendo uso da equação (4.10), o grau de serviço da célula para as condições sem interferência e com interferência é :

$$p_b = GS = \frac{59,64^{56} / 56!}{\sum_{i=0}^{56} 59,64^i / i!} = 0,1358 \quad (5.1)$$

$$p_b = GS = \frac{59,64^{50} / 50!}{\sum_{i=0}^{50} 59,64^i / i!} = 0,2118 \quad (5.2)$$

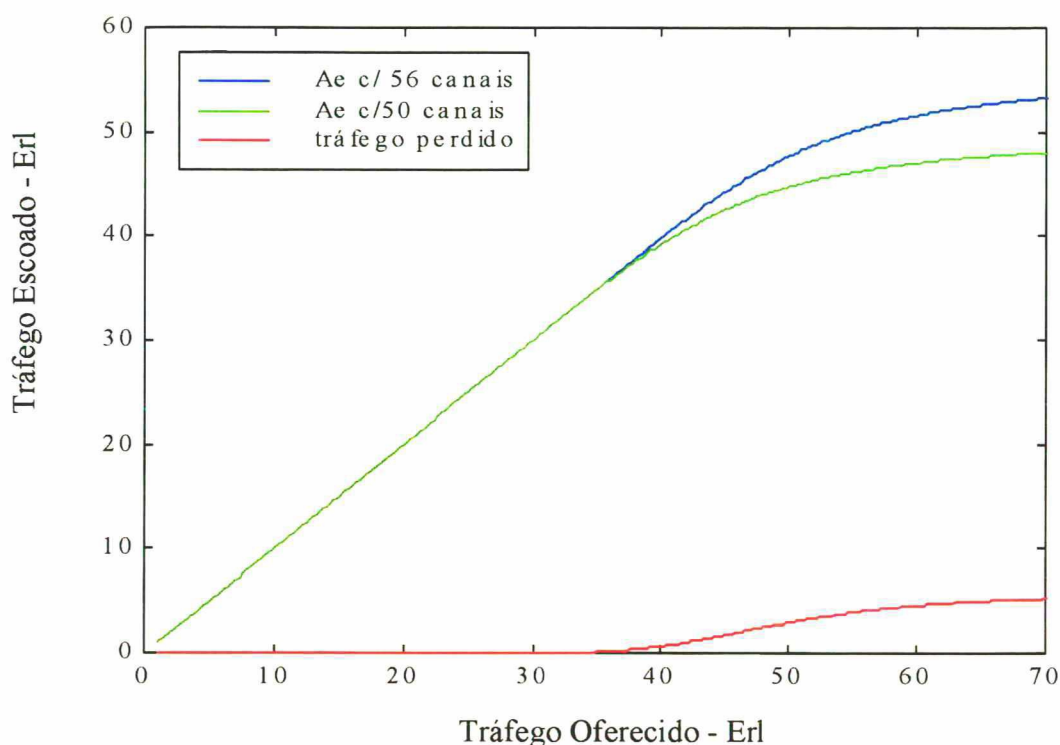
Portanto, na HMM da célula, ou seja, no período entre 12:00h e 13:00h, o grau de serviço da célula seria de 13,58% caso não houvesse interferência. Já sob o efeito da interferência o novo grau de serviço da célula passa a ser 21,18%. De outro modo, na condição de interferência, 21,18% das chamadas serão bloqueadas por falta de canais livres para conversação na HMM.

### 5.3.2 PERDA DE TRÁFEGO

Conforme mostrado na Seção 4.2.1, o tráfego escoado depende do tráfego oferecido e da quantidade de canais para suportar este tráfego. Lançando mão da equação (4.15) que descreve esta relação com o número de canais da célula Joinville Morro, traça-se a curva mostrada na Figura 5.5.

A Figura 5.5 mostra o tráfego escoado para as condições de número de canais da célula sem o efeito de interferência e a condição de perda de 6 canais por interferência, para vários valores de tráfego oferecido.

A diferença entre as curvas no eixo de tráfego escoado da Figura 5.5 representa a perda de tráfego para as várias condições de tráfego oferecido. A curva “Tráfego perdido” representa a diferença entre o tráfego escoado nas duas condições.



**FIGURA 5.5** Perda de tráfego escoado em uma célula de 56 canais com perda de 6 canais

Da Figura 5.5, verifica-se que o tráfego perdido depende do tráfego oferecido e só passa a ser expressivo para valores de tráfego oferecido acima de 40 Erl. Para fins de comparação, uma célula com 56 canais projetada para um grau de serviço de 2% tem capacidade de atender uma demanda de 45,9 Erl na HMM. Isto significa que, para uma média de tráfego por usuário de 20 mErl, esta célula tem capacidade de atender 2295 usuários. Com a perda de 6 canais e mantendo o mesmo grau de serviço, a capacidade de atendimento de tráfego passa para 40,3 Erl, representando uma capacidade de atender 2015 usuários. Na verdade, o sistema não terá o número de usuários reduzido e sim um aumento do bloqueio de chamadas, perda de tráfego e, conseqüentemente, uma diminuição da qualidade do sistema.

### 5.3.3 PERDA DE RECEITA

A perda de receita deriva da quantidade de tempo que foi perdido, quando houve a demanda para gerar minutos de conversação, mas não havia canais disponíveis para atender esta demanda.



Seguindo o método apresentado na Seção 4.2.2, para identificar a quantidade de tempo perdido, precisa-se identificar os valores de tráfego representativos de cada hora do dia, ou seja,  $\bar{A}_o(nT)$ .

Neste caso os valores de tráfego referem-se aos valores da Figura 5.4. Como a quantidade de dados limita-se ao período entre 8:00h e 22:00h, a análise de perda de tráfego se restringirá a este mesmo período. Mesmo porque, o tráfego fora deste período, espera-se ser menor do que 35 Erl de modo a não influenciar o resultado em questão. Como mostrado na Figura 5.5, para valores menores que 35 Erl, a perda de tráfego é praticamente zero.

O número de rádios (canais) que estão bloqueados por interferência constante ( $x(nT)$ ) é o mesmo no período em análise, sendo seu valor igual a 6.

Calcula-se o tráfego perdido em um dia, devido ao bloqueio de canais de voz utilizando a equação:

$$T_p = \sum_{n=1}^{24} \left\{ \bar{A}_o(nT) \cdot p_b \left[ \bar{A}_o(nT), (c - x(nT)) \right] \right\} \quad (5.3)$$

<b>n</b>	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$\bar{A}_o(nT)$	46,73	47,75	44,46	41,31	59,64	48,80	40,19	47,05	41,94	36,40	35,94	44,24	50,89	33,50
$p_b$	0,07	0,081	0,050	0,026	0,212	0,092	0,020	0,074	0,030	0,006	0,005	0,047	0,115	0,002
$Tp(n)$	2,96	3,40	2,06	1,05	7,71	3,71	0,77	3,11	1,22	0,21	0,17	1,94	4,56	0,06

**TABELA 5.1** Tráfego perdido por interferência em um dia

Logo, o resultado da equação (5.3) é 32,93 Erl, que representa o tráfego perdido em um dia.

Para calcular os minutos de conversação perdidos por dia ( $Mc$ ), basta converter a unidade Erlangs em tempo. Como o tráfego foi considerado no período de uma hora, aplica-se a conversação relativa a 60 minutos. Então,



$$M_c = T_p \times 60 = 32,93 \times 60 = 1976,09 \text{ [min]} \quad (5.4)$$

O valor da receita perdida depende agora, exclusivamente do valor da tarifa praticada por cada operadora. Utilizando o valor cobrado atualmente pela TIM Telesc Celular de R\$ 0,37 o minuto para ligações realizadas dentro da mesma área tarifária (*VC1*), a perda de receita por dia (*Pr*) expressa em moeda fica:

$$P_r = M_c \times VC1 = 1976,09 \times 0,37 = R\$ 731,15 \quad (5.5)$$

Se assumirmos que o perfil de tráfego da Figura 5.4 é válido somente para os dias de semana e que nos fins de semana o tráfego oferecido é sempre menor do que 35 Erl. Isto, representa que a perda de receita em um mês só ocorrerá nos 22 dias úteis do mês. Então, a perda de receita mensal seria de R\$ 16.085,00.

Portanto, interferência, com níveis de potência conforme mostrado neste estudo de caso, na faixa de frequência dos canais de voz do sistema celular, provoca aumento da probabilidade de bloqueio, perda de tráfego e, conseqüentemente, perda de receita para a operadora.

Já do ponto de vista do usuário, é uma perda considerável de qualidade de serviço a ele prestado. Pois, a HMM do sistema é o período mais provável para o usuário usar o serviço e, para os usuários servidos por esta célula, a probabilidade de insucesso de originar ou receber uma ligação é em torno de 21%, conforme mostrado na análise do grau de serviço. Vale lembrar que este nível de bloqueio só ocorre na HMM da célula que representa um período de uma hora, sendo que, para os outros períodos do dia o valor do grau de serviço tende a ser bem reduzido.

#### **5.4 DEGRADAÇÃO DO SISTEMA DEVIDO À INTERFERÊNCIA NO CANAL DE TRÁFEGO DE SINALIZAÇÃO**

A análise de degradação devido à interferência no canal de controle será feita conforme o método apresentado na Seção 4.3.2, onde os passos a serem seguidos são:

- 1) Determinar a função de probabilidade da potência do sinal no canal RECC;
- 2) Determinar a função de probabilidade da potência do ruído no canal RECC;
- 3) Determinar a função de probabilidade da razão sinal-ruído;
- 4) Determinar a probabilidade de erro de bit em função da distribuição de probabilidade da SNR;
- 5) Determinar a probabilidade de erro em cada campo da mensagem no canal RECC;
- 6) Determinar a probabilidade de erro da mensagem no canal RECC que representa a probabilidade de insucesso na origem e terminação de chamadas.

#### **5.4.1 A FUNÇÃO DE PROBABILIDADE DO SINAL E DO RUÍDO NO CANAL DE CONTROLE REVERSO (RECC)**

Foi empregado o programa de medição da central Ericsson conhecido como Radio Environment Statistic, para obtenção dos histogramas de sinal e ruído.

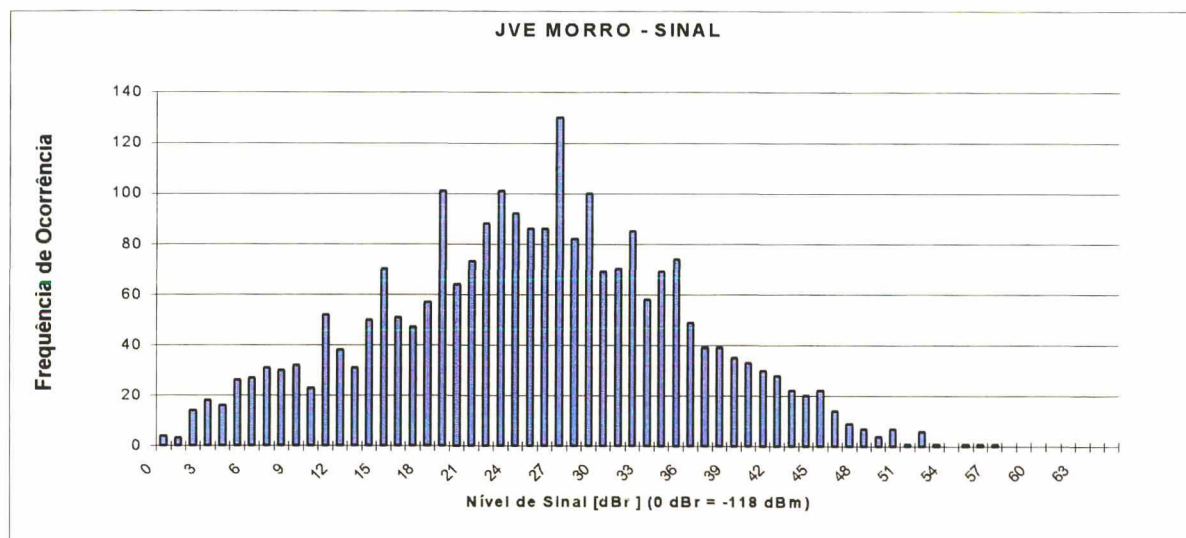
As medições foram feitas num período de uma hora com tamanho amostral de 594 amostras para o ruído e 2417 amostras para o sinal.

Durante o período de medição do ruído, a estação FM Jovem Pan operava normalmente e a estação celular estava com o canal de controle bloqueado para transmitir. Isto ocasiona que não haja sinal proveniente do sistema celular no receptor.

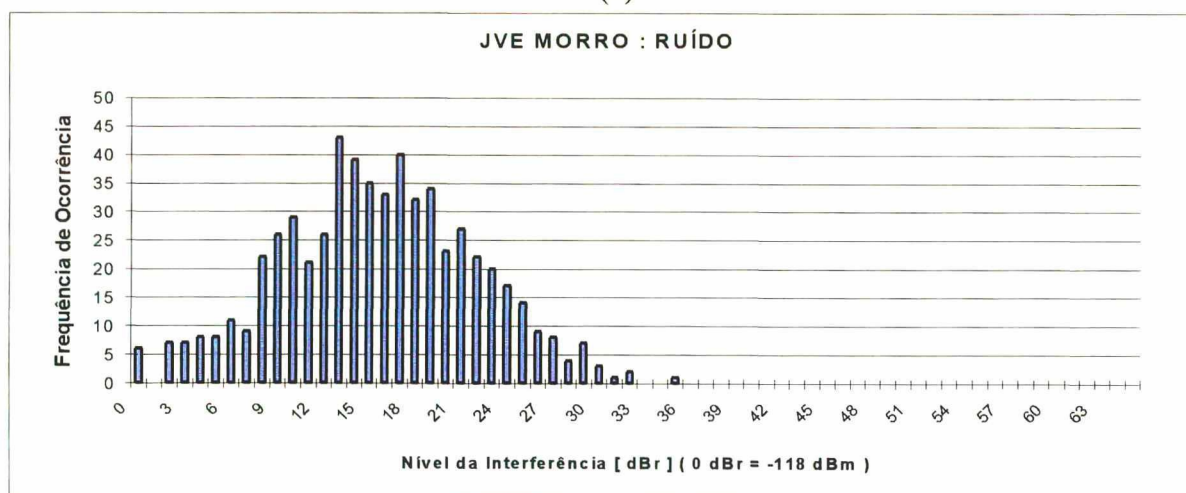
Durante o período de medição do sinal, a estação FM esteve desligada enquanto que a estação base Joinville Morro estava operando normalmente.

Estes cuidados são importantes para identificar o comportamento estatístico do sinal e do ruído sem interferência de um no outro e vice-versa.

A Figura 5.6 (a,b) mostra o histograma levantado com o programa de medição empregado. O eixo da abscissa está na unidade dBr, sendo que 0 dBr corresponde a  $-118$  dBm.



(a)



(b)

**FIGURA 5.6** Histograma de ocorrências de valores medidos de potência; **(a)** potência dos acessos no canal RECC; **(b)** potência do ruído provindo da estação FM.

Normalizando os valores de frequência de ocorrência pelo tamanho amostral, tem-se o diagrama de função de probabilidade, ou seja, as funções  $p_s(s)$  e  $p_n(n)$ . Na verdade, as grandezas potência de ruído e potência do sinal desejado no receptor do canal RECC são grandezas contínuas no tempo. Apesar disso, elas são representadas por uma função discreta, devido ao método empregado para a medição das amostras.

#### 5.4.2 A FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE DA RAZÃO SINAL-RUÍDO.

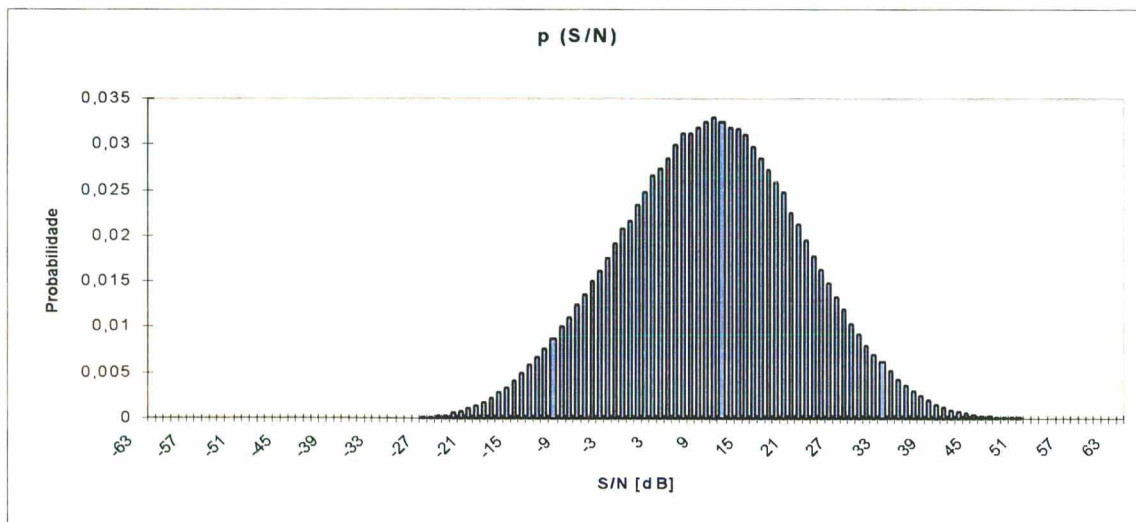
A variável aleatória razão sinal-ruído é, na verdade, o resultado de uma operação soma das variáveis aleatórias sinal e ruído. Pois, sendo o sinal e o ruído medidos em dBm, a razão sinal-ruído (SNR – Signal Noise Ratio) é a diferença entre o sinal e o ruído em dB.

Então, conhecendo as funções  $p_s(s)$  e  $p_n(n)$ , basta aplicar a equação (4.28), repetida abaixo, para conhecer a função densidade de probabilidade da SNR.

$$p_z(z) = \sum_{w=-\infty}^{\infty} p_s(z-w)p_n(-w) \quad (5.6)$$

As funções  $p_s(s)$  e  $p_n(n)$ , neste trabalho, são representadas por vetores do tipo 1x64, onde cada posição no vetor representa o valor da potência em dB e o valor correspondente à posição no vetor representa a probabilidade daquela potência.

O resultado da equação (5.6) está mostrado na Figura 5.7.



**FIGURA 5.7** Diagrama da função densidade de probabilidade da razão sinal-ruído.

### 5.4.3 A PROBABILIDADE DE ERRO DE BIT EM FUNÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DA SNR.

A partir do diagrama de probabilidade da SNR, basta aplicar as equações (4.20) e (4.21), reapresentadas abaixo, para determinar a probabilidade de erro de bit. O resultado da probabilidade de erro de bit caracteriza este sistema de comunicação que emprega modulação FSK com detecção não-coerente e que apresenta características estatísticas de sinal e ruído conforme a Figura 5.6

$$prob(erro|\gamma_b) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{1}{2}\gamma_b\right) \quad (5.7)$$

$$prob(erro) = \int_0^{\infty} prob(erro|\gamma_b) p(\gamma_b) d\gamma_b \quad (5.8)$$

onde  $\gamma_b$  é a razão entre a energia de bit e a potência do ruído e  $p(\gamma_b)$  é a função de densidade de probabilidade de  $\gamma_b$ . Logo, uma identidade que relacione a SNR e  $\gamma_b$  é requerida. SKLAR (1988) afirma que nós podemos escrever a seguinte identidade, mostrando a relação entre  $E_b/N_o$  e SNR para sinais binários:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{ST}{N_o} = \frac{S}{RN_o} = \frac{SW}{RN_o W} = \frac{S}{N} \left( \frac{W}{R} \right) \quad (5.9)$$

onde

S = potência média do sinal modulante;

T = duração de tempo de bit;

R = 1/T = taxa de bit;

N = NoW;

W = largura de faixa do canal.

Então, aplicando o fator W/R, no caso do sistema AMPS representa  $30 \cdot 10^3 / 10 \cdot 10^3$  e utilizando os dados  $p(\gamma_b)$  nas equações (5.7) e (5.8), resulta a seguinte probabilidade de erro de bit:

$$prob(erro) = 7,78 \cdot 10^{-2}$$



#### 5.4.4 A PROBABILIDADE DE ERRO DE CADA CAMPO DA MENSAGEM DO CANAL RECC

Os campos que compõem a mensagem do canal RECC, que podem acarretar em erro na decodificação da mensagem e, por conseguinte, descartar a mensagem recebida, são: a palavra de sincronismo, a palavra do DCC e as palavras de informação.

Nas palavras de informação são aplicadas as técnicas de múltipla transmissão combinada com o código BCH(48,36,5). Como a múltipla transmissão é feita bit a bit é preciso conhecer a probabilidade de erro de que pelo menos 3 bits estejam errados nas cinco repetições. Empregando a equação (4.29), resulta:

$$p' = \sum_{i=3}^5 \binom{5}{i} (7,78 \cdot 10^{-2})^i (1 - 7,78 \cdot 10^{-2})^{5-i} = 4,18 \cdot 10^{-3}$$

Agora, a probabilidade de erro de uma palavra de informação combinada com o código BCH(48,36,5), utilizando a equação (4.30) é

$$p_w = 1 - \sum_{m=0}^2 \binom{48}{m} (1 - 4,18 \cdot 10^{-3})^{48-m} \cdot (4,18 \cdot 10^{-3})^m = 1,095 \cdot 10^{-3}$$

A probabilidade de erro das cinco palavras de informação é a mesma, pois, possuem o mesmo comprimento de bits e as mesmas técnicas de múltipla repetição e código corretor de erro.

Para conhecer a probabilidade de erro da palavra do DCC, basta aplicar a equação (4.31), ou seja

$$p_{DCC} = 1 - \sum_{m=0}^2 \binom{7}{m} (1 - 7,78 \cdot 10^{-2})^{7-m} 7,78 \cdot 10^{-2} = 1,30 \cdot 10^{-2}$$

Para a palavra de sincronismo é preciso definir até quantos bits podem acarretar erro na mensagem. Como não foi encontrada na literatura pesquisada esta informação para o sistema AMPS, tomaremos quatro condições: na primeira admitiremos que qualquer erro na palavra de sincronismo acarreta em perda da mensagem; nas outras três condições

admitiremos a possibilidade de que qualquer padrão de erro contendo no máximo 1, 2 e 3 bits errados, em qualquer combinação possível, não ocasiona a perda da mensagem.

Portanto, a probabilidade de erro na palavra de sincronismo, também denominada de *probabilidade de perda de detecção*, para a palavra de 11 bits onde  $k$  erros ou menos são aceitos é dada pela equação (4.33):

$$\text{Para } k = 0 \quad P_d = \sum_{j=1}^{11} \binom{11}{j} (7,78 \cdot 10^{-2})^j (1 - 7,78 \cdot 10^{-2})^{11-j} = 0,5897$$

$$\text{Para } k = 1 \quad P_d = \sum_{j=2}^{11} \binom{11}{j} (7,78 \cdot 10^{-2})^j (1 - 7,78 \cdot 10^{-2})^{11-j} = 0,2090$$

$$\text{Para } k = 2 \quad P_d = \sum_{j=3}^{11} \binom{11}{j} (7,78 \cdot 10^{-2})^j (1 - 7,78 \cdot 10^{-2})^{11-j} = 0,0484$$

$$\text{Para } k = 3 \quad P_d = \sum_{j=4}^{11} \binom{11}{j} (7,78 \cdot 10^{-2})^j (1 - 7,78 \cdot 10^{-2})^{11-j} = 7,74 \cdot 10^{-3}$$

#### 5.4.5 A PROBABILIDADE DE ERRO DA MENSAGEM NO CANAL RECC

O objetivo final é determinar a probabilidade de insucesso no estabelecimento de uma chamada servida pela célula em questão, tanto sendo originada pelo usuário quanto uma chamada terminada para o usuário celular. Para isso, conhecida todas as probabilidades de erro dos campos da mensagem que carregam as informações necessárias para o estabelecimento da chamada, basta aplicar as equações (4.32) e (4.35)

$$p_m = 1 - \left[ \left( 1 - 1,30 \cdot 10^{-2} \right) \left( 1 - 1,095 \cdot 10^{-3} \right)^5 \right] = 1,84 \cdot 10^{-2}$$

A equação (4.35) resolvida para todas as condições de erro analisadas anteriormente resulta:

$$\text{Para } k = 0 \quad p_{\text{mes}} = 1 - (1 - 0,5897)(1 - 1,84 \cdot 10^{-2}) = 0,597$$

$$\text{Para } k = 1 \quad p_{\text{mes}} = 1 - (1 - 0,2090)(1 - 1,84 \cdot 10^{-2}) = 0,224$$

$$\text{Para } k = 2 \quad p_{\text{mes}} = 1 - (1 - 0,0484)(1 - 1,84 \cdot 10^{-2}) = 6,59 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{Para } k = 3 \quad p_{\text{mes}} = 1 - (1 - 7,74 \cdot 10^{-3})(1 - 1,84 \cdot 10^{-2}) = 2,60 \cdot 10^{-2}$$

Contudo, os valores de insucesso percebido no estabelecimento de chamadas são da ordem de algumas unidades de percentagem. Para o caso de  $k = 2$ , por exemplo, a probabilidade de erro de mensagem no canal RECC é 6,6%. Isto quer dizer que, de todas as tentativas de estabelecimento de chamadas, 6,6% serão perdidas por interferência no canal de controle da célula.

## 5.5 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo mostraram que interferência nos canais de voz afeta o grau de serviço do sistema e, conseqüentemente, aumenta a perda de tráfego. Além disso, o usuário servido pela célula sob interferência sentirá este efeito tanto para originar quanto para receber uma chamada. Pois, em ambos os casos, necessitará dispor de um canal de voz livre.

A degradação do sistema relativo aos canais de voz, depende do tráfego oferecido. Isto é, o efeito da interferência passará despercebido nos momentos de baixo tráfego e, por outro lado, será máximo na HMM. Neste estudo o grau de serviço atingiu 21% de bloqueio na HMM e, para o período de mais baixo tráfego, foi de 2%. Normalmente, o tráfego entre 24:00h e 6:00h está bem abaixo do tráfego durante o dia. Para estas condições, o grau de serviço seria praticamente 0%.



Além disso, o aumento do grau de serviço é percebido por todos usuários da mesma forma, ou seja, qualquer usuário que requisitar um canal de voz para estabelecer uma chamada enfrentará a mesma probabilidade de bloqueio.

A degradação do sistema referente à interferência nos canais de controle que afetam o tráfego de sinalização mostraram que a perda no estabelecimento de chamadas é bastante significativa, dado que ela ocorrerá independentemente do tráfego oferecido e do período do dia. Pois, mesmo que haja recursos de comunicação disponíveis, ou seja canais de voz, a chamada não ocorrerá porque o sistema é incapaz de decodificar as informações necessárias para a correta conexão da chamada.

Outro efeito importante a relatar sobre interferência em canais de controle é o fato de que esta análise foi feita do ponto de vista da estação celular. Isto é, o resultado nos diz que do total de acessos tentados por vários usuários servidos pela célula, uma parte deles será perdida. Mas, do ponto de vista do usuário, este fato não é verdadeiro. Para cada usuário, dependendo do caminho de rádio entre ele e a estação celular, o sinal enviado por ele chegará na estação celular com uma determinada potência.

Se o usuário estiver sob condições de propagação favoráveis e estiver próximo da estação celular, seu sinal chegará com uma potência forte o suficiente para lhe garantir uma razão sinal-ruído maior do que a maioria dos sinais dos outros usuários. Ou seja, olhando para a Figura 5.6a o nível do sinal deste usuário estaria no lado direito da curva, tão à direita quanto mais favoráveis forem as condições de propagação e sua proximidade da estação celular. Com isso, este usuário perceberia uma probabilidade de erro de estabelecimento de chamada bem mais reduzida do que os outros. Pois, com níveis de potência altos, a probabilidade de valores de razão sinal-ruído abaixo de 10 dB são muito baixas. Para usuários nesta condição, o efeito de interferência no canal de controle passaria despercebido.

Por outro lado, para usuários sob condições de propagação desfavoráveis e/ou localizados na borda da célula, os sinais provenientes deles chegarão na estação celular com níveis mais baixos de potência, implicando em probabilidades mais altas de erro de recepção de mensagens. Este efeito de insucesso parecerá crônico para usuários nestas condições de propagação com probabilidades de erro de mensagem próximo de 1. Além disso, o efeito de

insucesso não depende do tráfego ou período do dia, sendo que, o sistema apresentará a mesma situação de desempenho todo o tempo.

## **CAPÍTULO 6**

### **6 CONCLUSÃO**

Os sistemas celulares no mundo têm experimentado um crescimento sem precedentes. O número de usuários celulares no Brasil para este ano é estimado pela ANATEL em 12 milhões. Este número em 1997 era de apenas 2,5 milhões. O número de estações bases celulares instaladas cresce na mesma proporção. De outro modo, o negócio de comunicações móveis encontra-se em constante expansão.

Desde o desenvolvimento do padrão AMPS, buscou-se conceber um sistema que apresentasse, no mínimo, condições de qualidade de serviço proporcionadas pelos sistemas telefônicos convencionais. Logo, foi dada grande importância às questões que causam degradação de desempenho. Apesar disso, interferência provocada por outros sistemas, como as estações FM, provocam degradações de desempenho na estação sob interferência, e as consequências para o sistema celular não são bem conhecidas.

As estações comerciais de FM, mesmo em conformidade com as normas vigentes no Brasil, podem representar grandes ofensores da qualidade de sistemas celulares. Isto porque, utilizam potência de transmissão muito elevada e os sinais harmônicos, mesmo que desvanecidos dentro dos limites regidos pela legislação brasileira, são suficientes para interferir nos sistemas celulares que utilizam baixas potências.

O surgimento dos sistemas celulares e o emprego de baixas potências para as comunicações entre a estação base e as estações móveis dos usuários exigem que o espectro de frequências utilizado pelos celulares esteja livre de interferência de outros sistemas. Logo, uma legislação de controle do uso de rádio frequência mais rigorosa é necessária de modo a proteger os sistemas celulares.

Enquanto isso, a instalação de estações celulares próximas às estações FM deve ser evitada. Nos casos necessários, uma análise do espectro de frequências antes da instalação da estação celular pode ser útil para identificar possíveis problemas de interferência.

Interferências causadas por estações de FM provocam degradação de desempenho nos sistemas celulares, usando o padrão AMPS, que é percebida pelos usuários, além de ocasionar perda de tráfego e, conseqüentemente, perda de receita para as operadoras. Num cenário de competição este fator de interferência não é desejado.

O efeito da interferência de estações FM em sistemas celulares de segunda geração, que empregam modulação digital para voz e sinalização e técnicas de múltiplo acesso TDMA ou CDMA, é objeto de outro estudo específico.

Para determinar a degradação do sistema celular interferido por estações comerciais de FM é preciso uma análise das conseqüências da interferência nos canais de voz e canais de controle.

Para o tráfego de voz, interferência na faixa de frequência de operação do sistema celular provoca o bloqueio de canais de voz, ocasionando aumento do grau de serviço, ou seja, aumento da probabilidade de bloqueio de uma chamada por indisponibilidade de canais de voz. Para o tráfego de sinalização, interferência na faixa do canal de controle aumenta a probabilidade de erro de detecção de bit que, por conseguinte, aumenta a probabilidade de insucesso na decodificação das mensagens necessárias para a correta conexão da chamada.

No estudo de caso apresentado, as conseqüências da interferência nos canais de voz mostraram um aumento significativo do grau de serviço na HMM da estação base. Já nos momentos de baixo tráfego oferecido, o impacto da interferência não é percebido. A perda de tráfego escoado só é expressiva para situações onde o tráfego oferecido é maior que 40 Erl. Apesar disso, a soma do tráfego perdido devido à indisponibilidade dos canais bloqueados por interferência representou 33 Erl por dia. Este tráfego representa 1976 minutos de comunicação perdidos. Além da perda da operadora, o usuário percebe este efeito como um insucesso de estabelecer a comunicação, gerando insatisfação com o serviço.

Os efeitos da interferência nos canais de voz serão mais agravadas quanto maior for a largura de banda do sinal interferente. Pois, um maior número de canais de voz se tornarão indisponíveis para comunicação. Já os canais de controle serão mais afetados quanto maior for a frequência de ocorrência dos sinais interferentes com alta potência. Desde que o sinal

interferente esteja presente nos 30 kHz do canal de controle, a sua largura de banda não tem mais influência na degradação do tráfego de sinalização que trafega no canal de controle.

As consequências para o tráfego de sinalização traz sérios danos aos usuários servidos pela célula, pois todas as chamadas iniciadas dependem da troca de informações que ocorrem por este canal. Esta degradação, representada pela probabilidade de sucesso na origem de chamadas, foi analisada levando em consideração as estatísticas do sinal e ruído, o tipo de modulação, o formato dos sinais, o código empregado e a estrutura de mensagens que trafegam no canal de controle segundo o padrão AMPS.

Foi abordada a dificuldade em conhecer as estatísticas do sinal e do ruído e uma forma de levantamento experimental foi apresentada utilizando facilidades disponíveis nas centrais de comutação e controle.

Os resultados obtidos para o tráfego de sinalização mostraram uma probabilidade de erro de mensagem no canal RECC de 6,6%, considerando que até 2 erros são admitidos na palavra de sincronismo. Em comparação com o grau de serviço de 21%, pode representar uma degradação inferior ao ocorrido nos canais de voz. Mas, a perda no estabelecimento de chamadas ocorre independente do tráfego oferecido, sendo que, este efeito é percebido todo o tempo que o canal de controle estiver sob interferência.

Além disso, alguns usuários podem sofrer bloqueio sistemático na origem ou terminação de chamadas conforme sua posição ou condição de propagação.

Baseado nos resultados mostrados no estudo de caso apresentado neste trabalho, a diretoria da TIM Telesc Celular, em entendimento com a Diretoria da referida emissora FM, resolveu equipar os transmissores desta emissora com filtros apresentando características mais rigorosas de atenuação de sinais harmônicos de forma a reduzir os efeitos da interferência de sinais FM no sistema celular.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARREDONDO, G. A. & FEGGELER, J. C. & SMITH, J. I.. *Advanced Mobile Phone Service: Voice and Data Transmission*. In: The Bell System Technical Journal. USA: AT&T, v. 58, n. 1, jan, 1979.
- CALHOUN, George. *Digital Cellular Radio*. Norwood: Artech House, Inc. 1988.
- COX, Donald C.. *Wireless personal communications: A perspective*. In: GIBSON, Jerry D.. *The Mobile Communications Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 1996.
- GOODMAN, David J. *Wireless Personal Communication Systems*. Reading: Addison Wesley Longman, Inc, 1997.
- KUCAR, Andy D.. *Mobile radio: An overview*. In: GIBSON, Jerry D.. *The Mobile Communications Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 1996.
- LATHI, B.P.. *Communication Systems*. New York: JohnWiley & Sons, Inc, 1968.
- LEE, E. A. & MESSERSCHMITT, D. G.. *Digital Communication*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- LEE, William C. Y.. *Mobile cellular telecommunications systems*. Singapore: McGraw-Hill, 1990.
- LEE, Willian C. Y.. *Mobile Radio and Cellular Communications*. In: DORF, Richard C.. *The Electrical Enginnering Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- LINDSEY III, Jefferson F. & DOELITZSCH, Dennis F. *Radio*. In: DORF, Richard C.. *The Electrical Enginnering Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES. *Norma técnica para emissoras de radiodifusão em frequência modulada*, 07/80. Brasília, 1983.

- PAPOULIS, Athanasios. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. New York: MacGraw-Hill, 1965.
- PAPOULIS, Athanasios. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. New York: MacGraw-Hill, ed. 3, 1991.
- RAPPAPORT, Theodore. *Wireless Communications*. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- SKLAR, Bernard. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. New Jersey: Prentice Hall, 1988.
- SKLAR, Bernard. *Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part I: Characterization*. *IEEE Communications Magazine*, v.35, n.7, jul, 1997.
- STREMLER, Ferrel G.. *Analog Modulation*. In: GIBSON, Jerry D.. *The Mobile Communications Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 1996.
- YACOUB, Michel Daoud. *Foundations of Mobile Radio Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- YACOUB, Michel Daoud. *Cell Design Principles*. In: GIBSON, Jerry D.. *The Mobile Communications Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 1996.
- YACOUB, Michel Daoud. *Comunicações Móveis*. Notas de aula. UFSC. 1997.
- YOUNG, W. R.. *Advanced Mobile Phone Service: Introduction, Background and Objectives*. In: The Bell System Technical Journal. USA: AT&T, v. 58, n. 1, jan, 1979.
- YUE, On-Ching. *Design Trade-offs in Cellular/PCS Systems*. *IEEE Communications Magazine*, v.34, n.9, set, 1996.
- ZIEL, Aldert V. D.. *Noise: Sources, Characterization, Measurement*. New Jersey: Prentice-Hall, 1970.